



Contribution à l'objectivation des prestations dynamiques sur simulateur de conduite

Thomas Denoual

► To cite this version:

Thomas Denoual. Contribution à l'objectivation des prestations dynamiques sur simulateur de conduite. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2012. Français. NNT : . tel-00756682

HAL Id: tel-00756682

<https://theses.hal.science/tel-00756682>

Submitted on 23 Nov 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de DOCTORAT
(MANUSCRIT PROVISIOIRE)

Spécialité : GENIE MECANIQUE

Présentée et soutenue publiquement par :

THOMAS - DENOUAL

le 24 octobre 2012
à L'Ecole Centrale de Nantes

CONTRIBUTION A L'OBJECTIVATION DES PRESTATIONS DYNAMIQUES SUR SIMULATEUR DE CONDUITE

.....

JURY

Président : M. Améziane AOUSSAT

Professeur, CPI, Arts et Métiers ParisTech

Rapporteurs : M. Jean-Christophe POPIEUL
M. Simon Richir

Professeur, LAMIH, Université de Valenciennes
Professeur, P&I, Arts et Métiers ParisTech

Membres du jury : M. Andras KEMENY
M. Franck MARS
M. Jean-François PETIOT

Professeur associé, Renault, Arts et Métiers ParisTech
Chargé de recherche, IRCCyN
Professeur, IRCCyN, Ecole Centrale de Nantes

Directeurs de thèse : Jean-François PETIOT (Ecole Centrale de Nantes) et Andras KEMENY (Renault)

Co-encadrant : Franck MARS

Laboratoire : IRCCyN

N° ED ...à demander après soutenance

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS	- 1 -
INTRODUCTION GENERALE.....	- 3 -
Contexte	- 3 -
Problématique.....	- 4 -
Plan de lecture	- 5 -
 CHAPITRE 1.....	 - 7 -
CADRE GENERAL DES TRAVAUX.....	- 7 -
1.1 Les modèles de contrôle de trajectoire en situation de conduite.....	- 10 -
1.1.1 Rôle indices visuels	- 10 -
Modèle de Donges.....	- 10 -
Modèle « Time to lane crossing ».....	- 10 -
Flux optique.....	- 11 -
Utilisation du point tangent.....	- 12 -
1.1.2 Rôles des indices non-visuels	- 13 -
1.1.3 Modèles cognitifs hiérarchiques de la conduite.....	- 15 -
1.2 Evaluation des perceptions	- 18 -
1.2.1 Psychophysique	- 18 -
Relation entre grandeur d'un stimulus et intensité de la sensation.....	- 18 -
Notion de seuil.....	- 20 -
1.2.2 Mesure des perceptions.....	- 20 -
Grandeurs sensorielles.....	- 21 -
Echelles de mesures et références	- 22 -
1.2.3 Techniques d'évaluation des perceptions	- 22 -
Epreuve de classement.....	- 22 -
Epreuve de cotation.....	- 23 -
Epreuve d'intervalle.....	- 23 -
1.2.4 Application à l'évaluation de la conduite automobile	- 24 -
1.3 Eléments de dynamique véhicule et système de correction de trajectoire	- 26 -
1.3.1 Généralités sur la liaison au sol.....	- 26 -
Notion de dérive du véhicule	- 27 -
Dynamique angulaire.....	- 28 -
Systèmes de freinage.....	- 29 -
1.3.2 Le système ESC.....	- 31 -
Description et action sur le comportement véhicule.....	- 31 -
Aspects sécuritaires.....	- 33 -
Conception et mise au point	- 34 -
1.4 Les simulateurs de conduite	- 35 -

1.4.1 Généralités	35 -
Historique	35 -
Classification.....	37 -
1.4.2 Restitution des informations sensorielles	39 -
Restitution visuelle.....	39 -
Restitution inertielle.....	40 -
Plateformes.....	40 -
Stratégies de commandes	40 -
1.4.3 Applications	41 -
CHAPITRE 2	45 -
CONSTRUCTION D'UNE METHODOLOGIE D'ETUDE DE LA	
PERCEPTION DES PERTES D'ADHERENCE EN SIMULATEUR	45 -
2.1 Evaluation subjective de pertes d'adhérence.....	47 -
2.1.1 Introduction.....	48 -
2.1.2 Méthode	49 -
2.1.3 Résultats principaux.....	50 -
<i>Variables subjectives</i>	50 -
<i>Variables objectives</i>	51 -
2.1.4 Discussion.....	51 -
2.1.5 Conclusions.....	52 -
2.2 Manuscrit expérimentation 1	53 -
2.2.1 Introduction.....	55 -
2.2.2 Method	56 -
<i>Participants</i>	56 -
<i>Apparatus</i>	56 -
<i>Procedure</i>	58 -
<i>Data analysis</i>	60 -
2.2.3 Results.....	61 -
<i>Subjective data</i>	61 -
<i>Objective data</i>	61 -
2.2.4 Discussion.....	64 -
2.2.5 Conclusion	65 -
2.2.6 References	65 -
CHAPITRE 3	67 -
EVALUATION DES PERCEPTIONS ET RESTITUTION DE MOUVEMENT- 67	
-	
3.1 Influence du rendu inertiel sur l'évaluation de pertes d'adhérence.....	69 -
3.1.1 Introduction.....	69 -
3.1.2 Méthodes.....	69 -
3.1.3 Résultats principaux.....	70 -

Variables subjectives.....	- 70 -
Variables objectives	- 70 -
3.1.4 Discussion	- 70 -
3.2 Manuscrit expérimentation 2	- 73 -
3.2.1 Introduction.....	- 75 -
3.2.2 Method.....	- 76 -
Participants.....	- 76 -
Apparatus	- 76 -
Procedure	- 78 -
Data analysis	- 80 -
3.2.3 Results.....	- 81 -
Experiment 1: Static simulator.....	- 81 -
Subjective data	- 81 -
Objective data	- 82 -
Experiment 2: Dynamic simulator	- 82 -
Subjective data	- 82 -
Objective data	- 86 -
3.2.4 Discussion	- 86 -
3.2.5 Conclusion	- 88 -
3.2.6 References	- 89 -
CHAPITRE 4.....	- 91 -
MODELISATION DES EVALUATIONS SUBJECTIVES	- 91 -
4.1 Prédiction de l'évaluation subjective des pertes d'adhérence en virage – Quelles indicateurs objectifs observer ?	- 93 -
4.1.1 Introduction.....	- 93 -
4.1.2 Méthodes	- 94 -
4.1.3 Discussion	- 94 -
4.2 Manuscrit modélisation.....	- 96 -
4.2.1 Introduction.....	- 98 -
4.2.2 Materials and Methods	- 99 -
Participants.....	- 99 -
Static simulator.....	- 99 -
Dynamic simulator	- 99 -
Procedure	- 99 -
Objective indicators	- 100 -
Apparatus	- 101 -
Static simulator.....	- 101 -
Dynamic simulator	- 102 -
4.2.3 Data Analysis	- 103 -
4.2.4 Results.....	- 105 -
4.2.5 Discussion	- 108 -

4.2.6 Conclusion	- 109 -
4.2.7 Bibliography.....	- 110 -
CHAPITRE 5	- 113 -
VERS L'OBJECTIVATION DES PRESTATIONS ESC SUR SIMULATEUR .-	113 -
5.1 Applications à la caractérisation d'un ESC	- 115 -
5.1.1 Introduction.....	- 115 -
5.1.2 Méthodes.....	- 115 -
5.1.3 Résultats principaux.....	- 115 -
5.1.4 Discussion.....	- 116 -
5.2 Manuscrit expérimentation 3.....	- 117 -
5.2.1 Introduction.....	- 119 -
5.2.2 Method	- 120 -
Participants	- 120 -
Apparatus.....	- 120 -
Procedure	- 122 -
Data Analysis	- 123 -
5.2.3 Results.....	- 124 -
5.2.4 Discussion.....	- 126 -
5.2.5 Conclusions.....	- 127 -
5.2.6 References	- 127 -
CHAPITRE 6	- 129 -
CONCLUSION GENERALE	- 129 -
6.1 Synthèse des résultats.....	- 131 -
6.2 Perspectives	- 132 -
BIBLIOGRAPHIE.....	- 137 -

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 Modèle de contrôle de trajectoire à deux niveaux selon Donges.....	10 -
Figure 1.2: A. Vecteur du flux optique généré par un déplacement en ligne droite sur un sol plat. B. Vecteurs curvilinéaire du flux optique générés par un déplacement en courbe sur un sol plat. Ces deux champs de vecteurs sont définis pour un regard fixe. (source Wilkie et Wann, 2003)	12 -
Figure 1.3: Deux représentations du point tangent. A gauche, le point tangent est marqué par un cercle rouge. A droite, schéma du même virage vu de dessus. (Source : Navarro, 2008)	13 -
Figure 1.4 Découpage de l'activité de conduite (Michon, 1985)	16 -
Figure 1.5: Etapes physiologiques de la perception (source : SSHA, 1998)	18 -
Figure 1.6: Intensité de la sensation en fonction de la valeur du stimulus (source : SSHA, 1998)	19 -
Figure 1.7 Représentation schématique de la théorie de la détection du signal (Tiberghien, 1984)	20 -
Figure 1.8: Définition des angles utilisés dans l'automobile	27 -
Figure 1.9: Angle de dérive au centre de gravité du véhicule	28 -
Figure 1.10: La représentation des forces transversales en fonction de l'angle de dérive du pneu donne ses zones de fonctionnement. (1) zone linéaire croissante (adhérence), (2) zone non-linéaire croissante (pseudo-glissement), (3) zone décroissante (Glissement)....	28 -
Figure 1.11: Braquage des roues pour suivre le cercle R en fonction de l'accélération latérale. -	29 -
Figure 1.12 : Organes du système de freinage.....	30 -
Figure 1.13: Les composants du système ESC	31 -
Figure 1.14: Intervention d'un ESC selon la situation.....	32 -
Figure 1.15: Le tonneau Antoinette.....	36 -
Figure 1.16: Sensorama Simulator	36 -
Figure 1.17: Simulateur Toyota	37 -
Figure 1.18: Simulateur d'éco-conduite RENAULT fourni par la société OKTAL.....	38 -
Figure 1.19: Simulateur ULTIMATE RENAULT.....	38 -
Figure 1.20: Simulateur du laboratoire LAMIH à Valenciennes	38 -
Figure 1.21: Simulateur DESDEMONA de la société TNO (Pays-Bas).....	38 -
Figure 1.22: Plateforme de type Gough-Stewart	40 -
Figure 1.23: Principe du tilt-coordination (source : Vailleau 2010)	41 -
Figure 2.1: Simulateur de conduite du laboratoire IRCCyN. L'environnement visuel est affiché sur trois écrans LCD de 32 pouces d'une résolution de 1280 x 720 pixels. Les	

écrans latéraux sont inclinés de 45° par rapport à l'écran central. L'ensemble offre un champ de vision horizontal de 115° à une distance de 1 mètre.....	- 49 -
Figure 2.2 : Les variables objectives sont mesurées à l'intérieur d'un intervalle (T _T S) débutant au déclenchement de la perte d'adhérence (T _{pertub}) et s'arrêtant après le retour à la stabilité du véhicule (T _{fin}). La variation de la dérive du véhicule a été choisie comme indicateur de stabilité. L'écart latéral maximum (E _i) est mesuré par rapport à l'écart latéral moyen (E _{init}) en virage établi T _{init} avant la perturbation.....	- 51 -
Figure 2.3: IRCCyN driving simulator.....	- 57 -
Figure 2.4: Layout of the country track.	- 57 -
Figure 2.5: Input and output data.....	- 58 -
Figure 2.6: Visual environment in the bend.....	- 58 -
Figure 2.7: Visual answer interface of a question.....	- 59 -
Figure 2.8: ANOVA of the maximum steering wheel angle.	- 62 -
Figure 2.9: ANOVA of the maximum lateral deviation from the centre of the road.	- 62 -
Figure 2.10: Intensity perception.....	- 63 -
Figure 2.11: Duration perception	- 63 -
Figure 2.12: Danger	- 63 -
Figure 2.13: Fear feeling.....	- 63 -
Figure 2.14: Control feeling.....	- 63 -
Figure 3.1: (a) IRCCyN driving simulator. (b) Ultimate Renault driving simulator	- 78 -
Figure 3.2: Time to stability computation after LOA episode	- 80 -
Figure 3.3: Subjective answers about intensity and duration perceived, danger and control feeling for Experiment 1 (a,b,c,d) and for Experiment 2 (e,f,g,h).....	- 83 -
Figure 3.4: Subjective answers of visual and steering wheel perception of the LOA for Experiment 1 (a,b) and for Experiment 2 (d,e). Physical movement feeling on static simulator (c) and motion perception of the LOA on dynamic simulator	- 84 -
Figure 3.5: TTS indicator for static (a) and dynamic simulator (b)	- 86 -
Figure 4.1: (a) IRCCyN driving simulator. (b) Ultimate Renault driving simulator	- 102 -
Figure 4.2: Correlation between actual and predicted scores for control feeling (Eq. 9 & 13), perceived intensity (Eq.6 & 10) and danger (Eq.8 &12) (n=90) for static (a,b,c) and dynamic (d,e,f) simulator. Solid line: actual correlation, dotted line: perfect correlation..	- 107 -
Figure 5.1. Ultimate Renault driving simulator.....	- 121 -
Figure 5.2.Layout of the country track.....	- 121 -
Figure 5.3. Visual environment in the bend.....	- 122 -
Figure 5.4. ESC software model integrated in the MADA vehicle dynamics model.....	- 122 -
Figure 5.5. Input and Output data.....	- 124 -
Figure 5.6. Correlation between actual and predicted scores for control feeling, perceived intensity and danger (n=18) without ESC triggering (left a,b,c) and with ESC triggering (right a,b,c). Solid line: actual correlation, dotted line: perfect correlation (.....	- 125 -

LISTE DES TABLEAUX

Table 2.1 : Summary of the items corresponding to each question.....	- 60 -
Table 2.2: Maximum and mean TTS for each condition	- 61 -
Table 2.3: Summary of the statistical analyses performed on the effect of intensity and duration on the selected subjective variables.	- 63 -
Table 3.1: LOA conditions	- 79 -
Table 3.2: Questionnaire	- 79 -
Table 3.3: Experiment 1 - Summary of the statistical analyzes performed on the effect of intensity and duration on all subjective variables.	- 81 -
Table 3.4: Experiment 2 - Summary of the statistical analyzes performed on the effect of intensity and duration on all subjective variables.	- 85 -
Table 4.1: Questionnaire and definition of the rating scales for the LOA (Variable Y_{ij})	- 100 -
Table 4.2: Definition of the objective indicators (variables X_j).....	- 101 -
Table 4.3: Models parameters, selected objective variables and statistics of multiple linear regressions for subjective variables on static simulator.....	- 105 -
Table 4.4: Models parameters, selected objective variables and statistics of multiple linear regressions for subjective variables for dynamic simulator	- 105 -
Table 4.5: MAPE, Pc and coefficient correlation indicators for model forecast on static simulator.....	- 106 -
Table 4.6: MAPE, Pc and coefficient correlation indicators for model forecast on dynamic simulator.....	- 106 -
Table 4.7: Kruskal-Walis test results for between-subject effect on subjective items; df=19 and n=90 for each experiment.....	- 107 -
Table 5.1: LOA conditions	- 123 -
Table 5.2: RMSE, MAE and correlation coefficients for model forecast without ESC triggering.....	- 124 -
Table 5.3: RMSE, MAE and correlation coefficients for model forecast with ESC triggering. -	125 -

Avant-propos

Ce travail de thèse a fait l'objet de quatre articles. Un article de revue internationale et trois articles de conférence internationale. Ces articles constituent le corps de la partie expérimental de nos travaux. Ils sont présentés dans les chapitres 2 à 5.

Article 1. Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., Reymond, G. and Kemeny, A., Drivers' perception of simulated loss of adherence in bends. *Trends in driving simulation design and experiments*, 2010, A. Kemeny, F. Merienne, & S. Espié, eds., Les collections de l'INRETS, Paris, pp. 43-53.

Article 2. Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., Reymond, G. and Kemeny, A., Drivers' perception of loss of adherence in bends: influence of motion rendering. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2011, Vol. 11 / 041004-7. doi:10.1115/1.3622752

Article 3. Denoual, T., Petiot, J.-F., Mars, F., Reymond, G. and Kemeny, A., Predicting the subjective evaluation of vehicle behaviour in a driving simulator. *Engineering Systems Design and Analysis conference*, 2012, Nantes, France.

Article 4. Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., Reymond, G. and Kemeny, A., Toward predicting the subjective assessment of ESC in a driving simulator. *Proceedings of Driving Simulation conference*, 2012.

Une contribution a également été apportée à deux articles publiés dans des conférences internationales. Ces articles ne sont pas présentés dans ce manuscrit.

Article 5. Fang Z., Alirand M., André S., Denoual Th., Kemeny A., Reymond G., Jansson A., Multi objective analysis on a driving simulator applied to an electric vehicle: vehicle stability, handling and drivability, *Proceedings SIA 2011, Vehicle Dynamics Congress*, 5-6 Oct. 2011, Mulhouse, France, R-2011-04-18

Article 6. Fang Z., Kemeny A., Guo C.S., Deborne R., Denoual Th., Alirand M., Electric vehicle's stability study on low friction road based on driving simulator, *Proceedings of Driving Simulation conference*, 2012.

Introduction générale

Contexte

Depuis l'apparition de la première automobile vers la fin du XIX^{ème} siècle¹, l'industrie automobile a connu un essor fulgurant. Les constructeurs n'ont eu de cesse d'améliorer la performance, l'efficacité et la sécurité de leurs modèles, leurs méthodes de conception et de fabrication afin de proposer au plus grand nombre ce mode de déplacement². L'automobile fait aujourd'hui partie intégrante de notre quotidien et est ainsi devenue, pour la plupart, le principal mode de déplacement. Cependant, la généralisation de ce moyen de transport et l'augmentation associée du trafic fait que l'automobile est aujourd'hui encore responsable d'un nombre important de tués chaque année avec 3970 (statistique de l'ONISE en 2011³), et ce, malgré la mise en place de politiques de sécurité routière depuis 1972.

Les bilans statistiques montrent que l'une des principales causes d'accident est due à une perte de contrôle du véhicule. Les constructeurs et fournisseurs ont développés des systèmes de sécurité actifs, permettant d'assister le conducteur et tenter d'éviter l'issue souvent fatale de ces situations critiques. Le contrôle électronique de stabilité (ESC) est un système qui permet de corriger la trajectoire du véhicule en fonction des intentions du conducteur. Malgré les nombreuses études ayant démontré son efficacité significative dans la réduction du nombre d'accidents, ce système n'équipe qu'une part du parc automobile. Ainsi la commission européenne a décidé de rendre ce système obligatoire sur les nouveaux modèles de véhicules à partir de 2012⁴.

Bien que les problématiques de sécurité soient un axe de recherche majeur pour les constructeurs automobile, l'intégration de ce type de système représente un coût et des contraintes industrielles fortes. L'optimisation du développement et de la mise au point du système ESC, et plus généralement, des systèmes avancés d'aide au conducteur (ADAS), est donc un enjeu de performance pour l'ingénierie.

¹ Il s'agit de l'obéissant construite en 1873 par Amédée Bollée

² Le parc automobile est estimé à 1 031 284 909 véhicules en 2007 – Comité des Constructeurs Français de l'Automobile

³ Observatoire National Interministeriel de la Sécurité Routière, rapport en ligne

⁴ Texte officiel CEE-ONU - TRANS/WP.29/343

Toutefois, les facteurs sécuritaires et mécaniques ne sont pas les seules contraintes dans le développement et l'intégration d'un système de correction de trajectoire. Le conducteur faisant partie intégrante de la boucle de contrôle du véhicule, la prise en compte des facteurs humains est un élément essentiel. Elle nécessite d'utiliser des méthodes adaptées pour évaluer les perceptions et les réactions des conducteurs en situation de conduite.

Dans un contexte concurrentiel sévère, des évolutions majeures sont en cours dans les processus d'ingénierie afin de réduire les coûts et les délais, et améliorer la qualité. C'est pourquoi, les supports physiques, qui sont encore largement utilisés par les différents corps de métiers, tendent à céder leur place de manière grandissante aux outils numériques de calculs et de simulation.

Une autre tendance vise à intégrer plus largement le client dans la boucle de conception. Néanmoins, on peut aisément comprendre que pour des raisons de sécurité, mais également de procédure, il est compliqué de mener des études avec des conducteurs non experts dans des situations critiques sur route réelle ou sur piste. Les simulateurs de conduite présentent une alternative sûre et fiable dans ce sens.

En réponse à ces problématiques, le déploiement de l'utilisation des simulateurs de conduite nécessite donc l'exploration de nouvelles méthodologies de conception.

Problématique

L'objectif principal de cette thèse est de proposer une méthodologie d'usage, adaptée aux simulateurs de conduite, pour évaluer subjectivement des prestations liées à la dynamique du véhicule. Ceci, dans le but de contribuer notamment à la réduction des essais physiques dans le processus de développement de système type ESC.

L'étude de la dynamique du véhicule et de l'évaluation des perceptions sont des sujets vastes et complexes. En regard de l'objectif de ces travaux nous avons donc choisi de nous focaliser sur la perception des perturbations de trajectoire dans un cas d'usage pertinent au regard des conditions de déclenchement d'un ESC, c'est à dire une perte d'adhérence en virage. La mise en place de méthodologies d'évaluation subjective nécessite une approche pluridisciplinaire. D'une part, cette approche met en jeu la compréhension des mécanismes cognitifs et physiologiques liés à la perception et au contrôle du déplacement. D'autre part, elle prend en compte des contraintes applicatives et industrielles liées à la mise au point et à l'utilisation des outils de simulation.

Nous tenterons donc au travers de cette approche de répondre aux questions suivantes :

- D'un point de vue général :
 - Quelle(s) méthodes utiliser pour évaluer subjectivement une prestation de conduite sur simulateur ?
 - Quels sont les indices sensoriels mis en jeu ?
 - Comment relier les jugements subjectifs aux données objectives ?
- D'un point de vue plus appliqué :
 - Comment intégrer le simulateur comme outils dans le processus de conception ?
 - Comment mettre en place une évaluation subjective sur simulateur ?

Afin de répondre à ces questions, une série d'études expérimentales sur simulateur de conduite avec différents panels de conducteurs a été mise en place.

Plan de lecture

Dans le premier chapitre de ce manuscrit nous décrirons le cadre général de nos travaux. Nous aborderons les principes généraux de la perception du mouvement et du contrôle de la trajectoire en situation de conduite au travers notamment du rôle des informations sensorimotrices et des modèles cognitifs du conducteur. Nous détaillerons les principes et les méthodes couramment utilisés pour évaluer les perceptions. Nous ajouterons ensuite des éléments de compréhension de la dynamique du véhicule et des forces mises en jeu notamment lors des virages. Nous expliquerons enfin le principe de fonctionnement du système ESC et son impact sur le comportement du véhicule.

Dans le premier volet expérimental (CHAPITRE 2), nous présenterons une première étude exploratoire sur simulateur statique visant à mettre au point une méthode d'évaluation des pertes d'adhérence en virage. Deux types d'indicateurs seront utilisés, des indicateurs objectifs liés à la dynamique du véhicule ainsi qu'au contrôle de la trajectoire, et des indicateurs subjectifs basés sur la cotation de descripteurs verbaux.

Nous discuterons de l'influence des situations sur la variation des indicateurs et des indices sensoriels associés aux mécanismes de perception.

Dans un second volet expérimental nous étudierons l'influence des informations inertielles de restitution de mouvement sur l'évaluation des perceptions en reproduisant l'expérience précédente sur le simulateur dynamique hautes performances ULTIMATE de Renault.

Nous nous appuierons ensuite sur les données récoltées lors des deux premières expérimentations pour proposer une modélisation de la relation entre les indicateurs subjectifs et objectifs recueillis. Nous discuterons de la validité des modèles retenus et de leur capacité prédictive ainsi que des pistes d'amélioration.

Un dernier chapitre expérimental proposera d'appliquer les modèles décrits précédemment afin de caractériser l'action d'un ESC dans des situations similaires de perte d'adhérence en virage. Nous discuterons de l'influence du déclenchement de l'ESC sur la capacité des modèles à prédire les cotations subjectives correspondantes.

Au début de chaque chapitre expérimental, nous introduirons en français les objectifs visés à chaque étape, les méthodes utilisées, les principaux résultats et les enseignements essentiels issus de ces résultats. Le manuscrit associé sera ensuite présenté, en anglais, dans sa version publiée.

Nous reviendrons enfin dans un dernier chapitre sur les principaux résultats obtenus suivi d'une discussion sur les perspectives et opportunités soulevées par ce travail.

CHAPITRE 1

Cadre général des travaux

L'objectif principal de cette thèse est de proposer une méthodologie d'usage, adaptée aux simulateurs de conduite, pour évaluer subjectivement des prestations liées à la dynamique du véhicule. La réponse à cet objectif nécessite une approche pluridisciplinaire qui fait appel à des connaissances sur le comportement du conducteur, la dynamique du véhicule, les méthodes d'évaluation sensorielle et sur le fonctionnement des simulateurs de conduite.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à la façon dont les conducteurs contrôlent leur trajectoire. Pour cela, il est nécessaire de se référer aux modèles cognitifs du contrôle de la trajectoire en mettant l'accent sur les informations visuelles, inertielles et haptiques (section 1.1). Cependant, les modèles et connaissances actuelles concernent exclusivement le contrôle de la trajectoire en situation nominale. Ils ne permettent pas de faire des prédictions dans les cas limites comme les situations de perte d'adhérence.

Par ailleurs, l'évaluation subjective des prestations en situation de conduite nécessite la mise en place de méthodes appropriées se basant sur les principes de la psychophysique. La section 1.2 abordera les méthodes utilisées pour mesurer les perceptions ; d'une part les théories et pratiques générales, et d'autre part les applications spécifiques à l'évaluation de la conduite automobile.

Les enjeux industriels de cette thèse nous amène à étudier le cas particulier des situations de pertes d'adhérence et les actions d'un système de correction de trajectoire (ESC). Une des actions principales de ce système est de modifier le couple de lacet du véhicule pour le maintenir dans une trajectoire correcte. Nous aborderons dans la section 1.3 les éléments principaux de la dynamique du véhicule et plus particulièrement de la liaison au sol, ainsi que les actions du déclenchement d'un ESC.

Une des originalités de cette thèse est que cette évaluation sera faite sur simulateur de conduite. Cette particularité implique des contraintes et des limites par rapport à une conduite réelle. Nous détaillerons dans la section 1.4 les modalités de restitution des informations sensorielles dans un simulateur, ainsi que les applications se rapprochant de notre cas d'étude.

La pluridisciplinarité de cette thèse, et le vaste champ de connaissance qui s'en rapporte, nous amène à faire une synthèse succincte de ces différents aspects en mettant en avant les points se rapportant à notre étude. Le lecteur pourra se référer aux différents auteurs cités pour approfondir chaque section.

1.1 Les modèles de contrôle de trajectoire en situation de conduite

1.1.1 Rôle indices visuels

Modèle de Donges

Le modèle classique de contrôle de trajectoire proposé par Donges (1978) est découpé selon deux niveaux opérant en parallèle. Un contrôle lointain de la trajectoire est réalisé en boucle ouverte et permet d'anticiper sur les actions à venir. Le second niveau concerne le traitement des informations proches et permet de corriger rapidement un écart de la position latérale du véhicule.

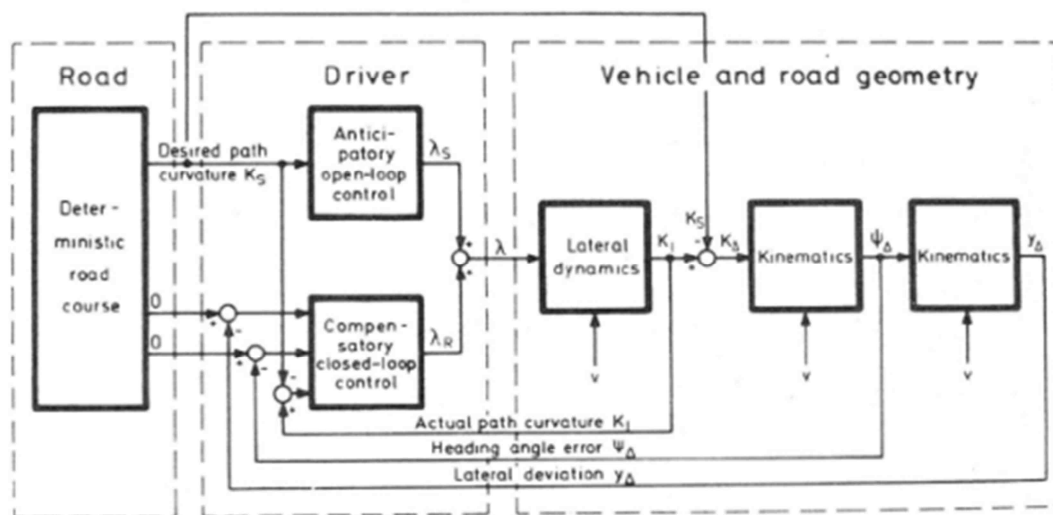


Figure 1.1 Modèle de contrôle de trajectoire à deux niveaux selon Donges

Modèle « Time to lane crossing »

Le modèle de Donges est un modèle continu qui implique que le conducteur contrôle en permanence sa trajectoire. Cependant, il existe des moments où le volant est maintenu fixe par le conducteur. Pour tenir compte de cet état, Goethelp et al. (1984) ont proposé un modèle discret de même type prédicteur-correcteur. Le critère permettant de changer de mode, volant fixe ou compensation, est un temps appelé TLC (Time to Lane Crossing). Ce critère représente le temps nécessaire au véhicule pour atteindre le bord de la voie si le volant restait fixe.

Flux optique

Le flux optique est considéré comme une des informations primordiales pour la conduite et la locomotion (Lappe et al, 1999). Ce flux optique correspond au champ de vecteur des vitesses apparentes des objets sur le plan image. Le traitement de l'image est effectué par la lecture de l'information projeté sur la rétine. Cette image correspondrait au flux optique si les yeux étaient complètement fixes, mais le mouvement des yeux crée des déformations sur le champ de vitesse du flux optique. On parle alors de flux rétinien composé d'un mouvement de translation (corps) et de rotation (yeux). En d'autres termes, lors du déplacement d'un individu, les objets de l'environnement sont projetés sur l'œil et défilent. Cette vitesse de défilement donne par exemple une information sur la distance entre les objets et permet d'éviter des obstacles. La direction du regard a été étudiée pour montrer son influence sur le contrôle de la trajectoire (Wilkie et Wann, 2003).

Une théorie de l'utilisation du regard et du flux rétinien a été proposée par Wann et Swapp (2000). Si le conducteur suit une trajectoire passant à travers une porte et fixe un point situé entre les montants de la porte, les lignes de champs restent droites. Une trajectoire déviant à l'extérieur de la porte, tout en gardant un point de fixation entre les montants va modifier la courbure des lignes de champs. Cette courbure donne une information sur l'erreur de la trajectoire et permet de la corriger.

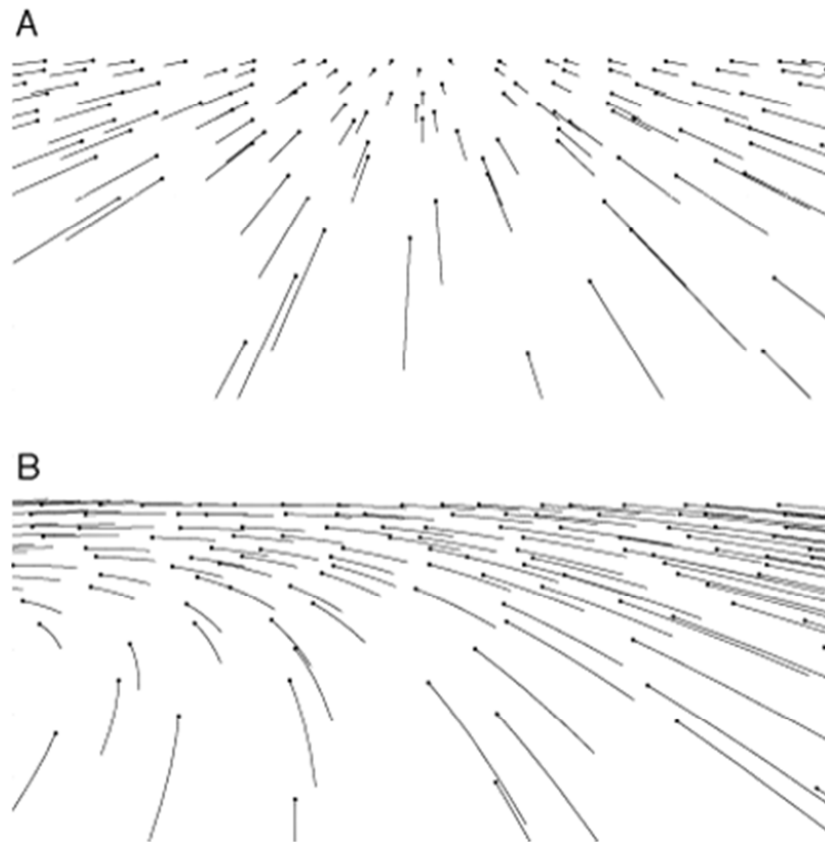


Figure 1.2: A. Vecteur du flux optique généré par un déplacement en ligne droite sur un sol plat. B. Vecteurs curvilinéaire du flux optique générés par un déplacement en courbe sur un sol plat. Ces deux champs de vecteurs sont définis pour un regard fixe. (source Wilkie et Wann, 2003)

Utilisation du point tangent

Une stratégie spécifique a ainsi été observée lors de conduite en virage en observant les mouvements oculaires. Dans ce cas, le regard est dirigé vers un point spécifique à l'intérieur du virage, Land et Lee (1994) ont mis en évidence ce point appelé « point tangent » (Figure 1.3). Une expérience sur simulateur a montré que l'affichage de ce point pendant une courbe réduit la variation de position par rapport à la trajectoire et donne une information supplémentaire pour la stabilité du contrôle de la trajectoire (Mars, 2008).

Authié et al. (2012) ont étudié le lien entre point tangent et flux optique. Dans une expérience simulant des flux optiques représentant des déplacements curvilinéaires, ils ont montré que le point tangent correspondait à un minimum local de vitesse dans le flux optique. Ils ont également montré que diriger son regard dans cette zone permettait de baisser le seuil de détection des changements de direction.

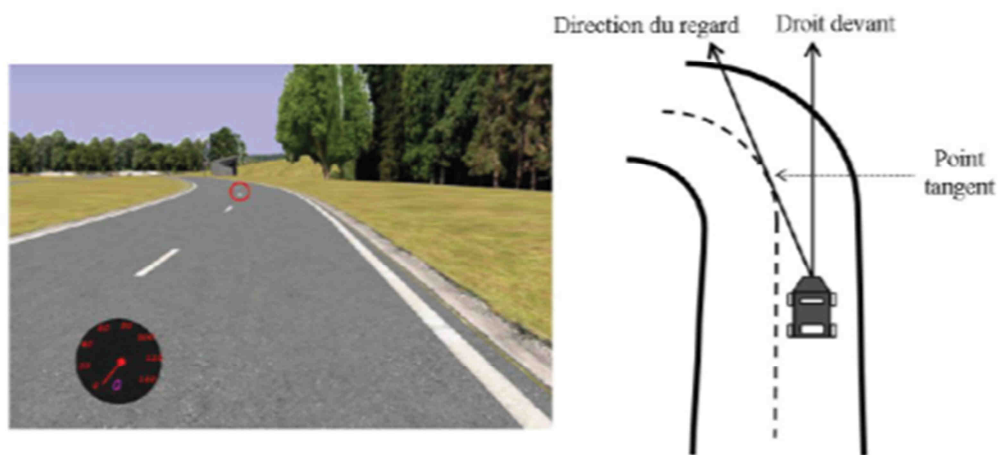


Figure 1.3: Deux représentations du point tangent. A gauche, le point tangent est marqué par un cercle rouge. A droite, schéma du même virage vu de dessus. (Source : Navarro, 2008)

1.1.2 Rôles des indices non-visuels

Il a été montré que les indices auditifs ont également une influence dans le contrôle d'un véhicule, notamment pour juger de sa vitesse (McLane et Wierwille, 1975 ; Horswill et McKenna, 1999). Cependant, l'étude de l'influence de ces indices sort du cadre de nos travaux. Nous nous focaliserons donc dans cette section sur les indices inertiels.

Les stratégies de contrôle visuel ont été et continuent d'être largement étudiées. Il est généralement admis qu'elles occupent une place déterminante dans le contrôle de la trajectoire d'un véhicule. Néanmoins, des études ont montré que l'absence de restitution de mouvements physiques dans un simulateur perturbait les réactions des conducteurs (Boer, 2000). Dans leur revue sur l'utilisation des indices sensorielles pendant la conduite, Kemeny et Panerai (2003) suggèrent que les indices inertielles et notamment vestibulaires occupaient une place non négligeable dans la perception du mouvement sur route et dans un simulateur.

L'influence de la restitution ou non des informations vestibulaires sur le temps de réaction des conducteurs a été étudiée par Wierwille et al (1983) sur un simulateur de conduite. Les sujets étaient soumis à un « coup de vent » durant leur parcours et le temps de réaction à cette perturbation a été mesuré. Cette perturbation a un effet principal sur la perception du roulis. La restitution des mouvements de la cabine a volontairement été coupée pour un des deux groupes de sujets. On remarque ainsi que le temps de réponse à la perturbation augmente pour le groupe qui ne bénéficie pas de la restitution de mouvement. Ces résultats montrent donc que, pour ces conditions, la

restitution des informations vestibulaires a un impact sur le contrôle de la trajectoire en modifiant le temps de réaction des conducteurs.

Une autre étude a été menée par Siegler et al (2001) pour des situations de freinage et de virage. Ces deux expériences ont également montré un effet de la restitution des stimuli vestibulaires sur la stratégie de freinage et la trajectoire en virage. La stratégie de freinage des conducteurs qui ne bénéficiaient pas des stimuli vestibulaires se modifiait en fonction du temps. Elle présentait des décélérations trop fortes et non réalistes comparée aux autres conducteurs dont la stratégie de freinage restait invariante. De même, la restitution latérale du mouvement entraîne une prise plus large des virages et diminue le survirage par les conducteurs comparés à ceux où seules les informations visuelles sont disponibles. Ces expériences montrent l'influence des informations de mouvements sur la boucle de contrôle de la trajectoire du conducteur.

Wilkie et Wann (2005) ont proposé de stimuler les canaux semi-circulaires afin de vérifier l'influence des informations vestibulaires dans le contrôle de la direction, en particulier le lacet. Les sujets étaient assis sur une chaise motorisée qui tournait proportionnellement à l'angle imposé par un joystick. Ils ont conclu que les informations vestibulaires (ici angle de lacet) avaient peu ou pas d'effets sur le contrôle de la trajectoire sauf dans le cas où les informations vestibulaires sont en totale contradiction avec les informations visuelles. Ces résultats, établis à des vitesses faibles (<30km/h), mettent en jeu de faibles forces d'accélération qui sont peut-être ignorées à ce niveau. Il conviendrait de vérifier ces résultats pour des vitesses plus élevées et des situations de perte de contrôle (par exemple fort survirage) où la valeur de l'accélération de lacet peut devenir beaucoup plus élevée.

Reymond et al. (2001) ont montré que la restitution de l'accélération latérale dans une conduite en virage sur simulateur permet de mieux percevoir sa vitesse en courbe. Les sujets conduisent plus rapidement sur simulateur à base fixe alors qu'ils ont la sensation de conduire à la même vitesse. Selon les auteurs, la vitesse choisie pour prendre le virage dépend directement de la sensation d'accélération perçue. Ils proposent ainsi un modèle qui décrit le comportement des conducteurs dans le choix de leur vitesse en courbe comme un ajustement entre la vitesse perçue et une marge de sécurité caractérisée dans ces expériences par une valeur minimum de TLC.

Lors d'une conduite en virage, les informations visuelles et inertielles ne sont pas les seules sources utilisées par le conducteur. Le volant, organe indispensable pour envoyer des consignes de trajectoire au véhicule, est également une source

d'information non négligeable pour contrôler sa trajectoire. Lorsqu'un angle est appliqué au volant pour faire tourner le véhicule, des forces résultantes liées au contact sol/pneumatique (voir 1.3.1 Généralités sur la liaison au sol) sont renvoyées sous la forme d'un couple de retour d'effort. Ces forces, proportionnelles à l'angle du volant, renseignent ainsi le conducteur sur l'état instantané de la liaison sol/pneumatique (adhérence) et la courbure du virage. Dans nos véhicules de tourisme, les constructeurs mettent généralement en place des systèmes d'assistance afin de limiter ces efforts et privilégier le confort de conduite. Les technologies suivantes sont principalement utilisées, démultiplication variable, directions assistées hydrauliques ou électriques. Cependant, cette source d'information reste essentielle pour bien contrôler son véhicule. Toffin et al. (2003) ont ainsi montré, dans une expérience sur simulateur de conduite, que les conducteurs sont capables de s'adapter à différentes stratégies de retour d'effort mais que l'absence de couple ou la présence de couples incohérents rendait la tâche de conduite très compliquée. En configuration classique, Essma (2000) a montré que le couple de retour d'effort était proportionnel à l'accélération latérale du véhicule. Newberry et al. (2007) ont, de plus, montré que ce retour d'effort, plus que l'angle volant lui-même, était un meilleur descripteur de la « sensation de direction ». Par une expérience, ils ont défini que l'accroissement de l'intensité de la perception du retour d'effort suit une loi de puissance (Stevens, voir 1.2.1 Psychophysique) avec un exposant de 1,39. La perception de cette force grandit ainsi plus vite que son accroissement réel. Dans des situations de pertes d'adhérences brutales, l'accélération latérale du véhicule est significativement impactée et modifie les forces résultantes de la liaison au sol (voir 1.3.1 Généralités sur la liaison au sol). Dans ces conditions, les informations provenant du volant doivent fournir des éléments importants au conducteur pour qu'il détecte les modifications de trajectoire.

Au sein des équipes d'ingénierie, il est communément admis que les sensations transmises au travers du volant sont primordiales pour détecter des perturbations ponctuelles de la trajectoire ou estimer l'atteinte des limites d'adhérence du véhicule.

1.1.3 Modèles cognitifs hiérarchiques de la conduite

L'activité de conduite est généralement découpée en trois niveaux de contrôle correspondant à trois type de tâches effectuées simultanément mais à des degrés d'exigences cognitives et temporelles différents (Michon, 1985, Figure 1.4).

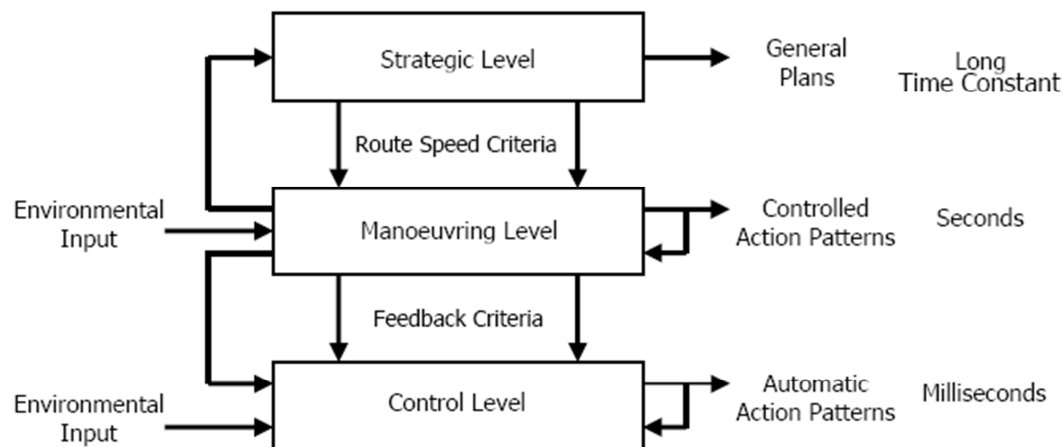


Figure 1.4 Découpage de l'activité de conduite (Michon, 1985)

Le niveau stratégique (Strategic level) correspond aux tâches cognitives les plus fortes. C'est le niveau le plus haut dans la hiérarchie. Ce niveau agit sur la planification à long terme du trajet (itinéraire).

Le niveau tactique (Manoeuvring level) a une exigence cognitive moins importante mais requiert une décision avec une plus forte contrainte temporelle. Un bon exemple est l'approche d'un virage. Un conducteur pressé pourra par exemple décider, pour gagner du temps, de couper l'intérieur du virage.

Au niveau opérationnel (Control Level), l'exigence cognitive est très faible mais la contrainte temporelle est très élevée. Le conducteur fait plutôt ici appel à des modèles internes de contrôle sensori-moteur du volant ou des pédales par exemple. Les actions de régulation de la vitesse ou de contrôle latéral réalisés à ce niveau sont presque totalement automatisées (angle du volant en fonction de la lecture des changements de courbure du virage, par exemple).

Cette mise en niveau des tâches de conduite peut être mise en relation avec la catégorisation des tâches selon Néboit (1974) :

- La navigation, planification du trajet par un processus de haut niveau.
- Le guidage, contrôle dynamique de la trajectoire en fonction des informations sensorielles directement disponibles.
- Le pilotage, action sensori-motrice qui permet de diriger et maîtriser le véhicule ainsi que de répondre à la consigne de trajectoire.

La partie pilotage met en œuvre les perceptions sensorielles du véhicule et les corrections directes, quasi automatiques, à appliquer pour maintenir sa trajectoire. C'est à ce niveau de tâche que les outils dynamiques d'aide à la conduite tel les correcteurs

de trajectoire interviennent et peuvent créer un conflit. Nous nous attarderons plus particulièrement sur ce niveau de tâche dans ces travaux.

De façon générale, on peut considérer que le conducteur exécute la tâche de pilotage en agissant sur le contrôle latéral et longitudinal de son véhicule. Les différentes études sur le sujet parlent principalement du contrôle latéral ou longitudinal mais rarement des deux à la fois. Dans le cas d'une conduite en virage, le comportement dynamique du véhicule implique nécessairement d'étudier ces deux dimensions en parallèle.

Enfin, la plupart des modèles sensorimoteurs proposés pour expliquer l'utilisation des différentes informations sensorielles ont été définis pour des conditions normales de conduite. Peu de choses sont connues sur l'utilisation des informations sensorimotrices dans la détection et la réaction à des épisodes de perte d'adhérence. Les modèles cognitifs hiérarchiques placent principalement l'activité sensorimotrice de correction au volant au niveau opérationnel, sous le niveau de conscience (Hollnagel, 2004 ; Michon, 1985). Hoc et Amalberti (2007) ont montré qu'un passage au niveau conscient survenait lors de perturbations externes. L'étude des réactions des conducteurs à des perturbations de trajectoire (perte d'adhérence par exemple) et le recueil, en parallèle, de leurs perceptions, pourrait donc être un moyen d'explorer comment les informations sensorimotrices déterminent l'évaluation consciente de ces situations.

1.2 Evaluation des perceptions

Dans cette section, nous allons détailler les principes de la perception des stimuli et les méthodes pour les mesurer.

1.2.1 Psychophysique

La psychophysique est la « science exacte de la relation fonctionnelle entre les mondes physiques et psychiques » (Fechner, 1860). C'est une science pluridisciplinaire qui implique deux spécialités, la physiologie et la psychologie. En résumé, la perception d'un stimulus est le résultat du traitement de l'information par le système nerveux central. Elle traverse plusieurs étapes avant d'être interprétée au niveau conscient comme une réponse sensorielle (Figure 1.5).

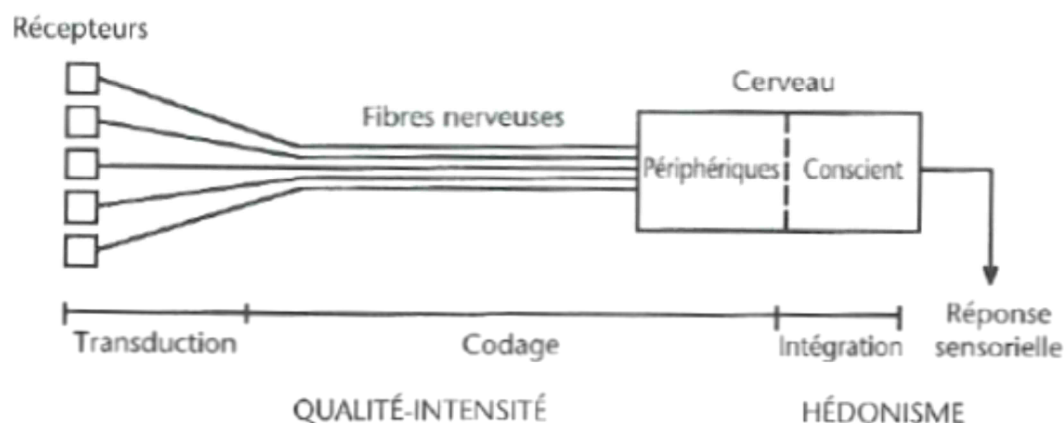


Figure 1.5: Etapes physiologiques de la perception (source : SSHA, 1998)

Relation entre grandeur d'un stimulus et intensité de la sensation

Il est admis que la relation entre un stimulus et son intensité perçue est une fonction mathématique dont la courbe a une allure sigmoïde (Figure 1.6)

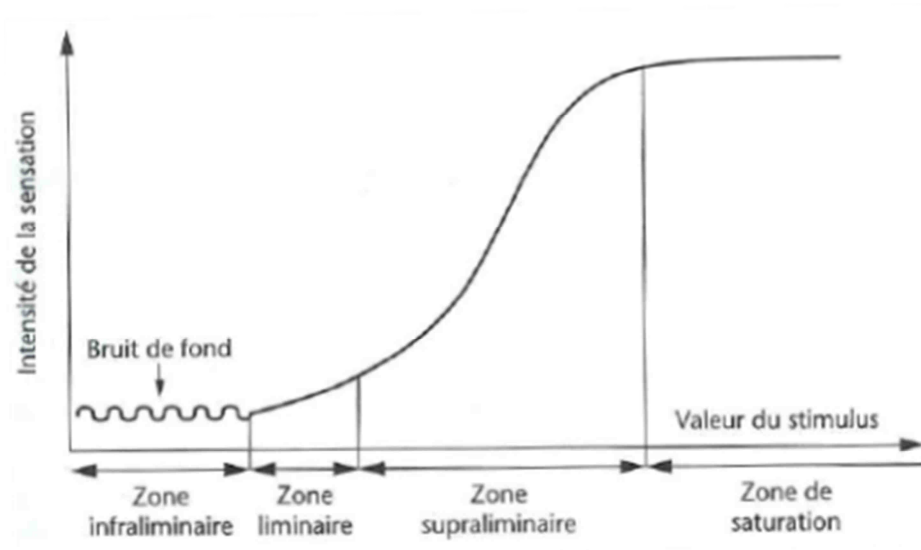


Figure 1.6: Intensité de la sensation en fonction de la valeur du stimulus (source : SSHA, 1998)

Le domaine infraliminaire correspond à une sensation confuse, instable et noyée dans le bruit de fond. Le domaine liminaire correspond à une sensation perçue de façon aléatoire, nette ou confuse, et d'intensité faible. Le domaine supraliminaire correspond à une sensation nette qui peut varier de faible à forte. Enfin la zone de saturation est le domaine où la sensation ne varie plus en fonction de la grandeur du stimulus. Cette zone peut provoquer une gêne voire une douleur.

Deux modèles principaux ont été proposés pour décrire la courbe dans la zone supraliminaire.

Le modèle de Fechner :

$$I = k \log S \quad (\text{Equation 1.1})$$

Ce modèle met en relation une différence minimum détectable pour exprimer une unité physique qui correspond à une unité de sensation. On a donc une relation logarithmique où **I** est l'intensité de la sensation, **S** l'intensité physique du stimulus et **k** une constante, fonction des modalités extérieures et du stimulus. Il correspond à l'emploi d'échelle d'intervalles entre deux valeurs de stimulus.

Le modèle de Stevens :

$$I = KS^n \text{ soit } \log I = n \log S \quad (\text{Equation 1.2})$$

Ce modèle part du principe qu'il existe une relation d'égalité de rapports entre les stimuli et les sensations. Cette égalité est vérifiée pour une relation de puissance avec **I** l'intensité de la sensation, **S** l'intensité physique du stimulus, **k** une constante, fonction des conditions expérimentales et **n**, aussi appelé pente de Stevens, caractéristique du

stimulus qui exprime la vitesse d'accroissement de la sensation en fonction du stimulus. Il correspond à l'emploi d'échelles de rapports de concentrations du stimulus.

Notion de seuil

On entend par seuil de perception le niveau à partir duquel un sujet peut différencier deux produits, les comparer ou bien les décrire. L'existence d'un seuil suppose donc une limite finie qui n'est pas représentative de la réalité. Cette frontière est une zone (zone liminaire) définie par une fonction de densité de probabilité de détection.

Il existe deux grandes théories traitant de la notion de seuil de perception. La première dite classique utilise les fonctions « normale cumulée » (Reuchlin, 1978) qui calculent respectivement la fréquence des réponses correctes et la densité de probabilité des réponses correctes. Une fonction « log-normale cumulée » a été proposée pour être en accord avec les relations de Fechner et Stevens qui consiste à mettre en abscisse le logarithme des grandeurs brutes du stimulus. Elles sont valables pour des épreuves avec au moins deux produits. La seconde est la théorie de la détection du signal, qui permet de calculer à la fois indice de sensibilité (détection du signal) et de stratégie (prise de décision).

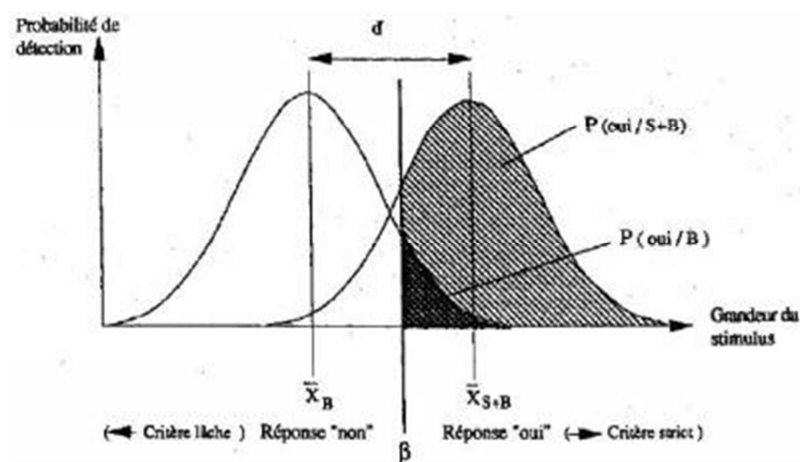


Figure 1.7 Représentation schématique de la théorie de la détection du signal (Tiberghien, 1984)

1.2.2 Mesure des perceptions

La caractérisation de la réponse sensorielle nous renseigne sur les informations que nous pouvons obtenir, sur le processus cognitif qui permet de créer cette information et sur les mécanismes qui permettent de donner un sens à cette information. Nous allons maintenant nous intéresser à la mesure de la perception, c'est-à-dire la définition quantitative qui permet de relier une sensation à un stimulus. L'évaluation sensorielle peut être ramenée à une simple interaction entre l'expérimentateur et le

sujet. La psychophysique, par Fechner ou Stevens, a montré qu'il existe une relation quantifiable entre un stimulus physique et sa perception par un sujet. Cet observable reproductible et prévisible est plus connu sous le terme générique de réponse à stimulation sensorielle. Cette réponse peut se retrouver sous 4 formes dont les 3 premières sont directement appréciables par l'expérimentateur (SSHA, 1998) :

- Réponse physiologique, sensation ou manifestation physique non utilisable dans un contexte d'évaluation sensorielle.
- Réponse psychologique, gnosie qui est par essence non communicable
- Réponse comportementale, spontanée (réflexe) ou apprise, elle reflète la sensation et peu ou pas la perception.
- Réponse verbale, se situe à l'interface entre la perception et le réel, son contenu sémantique est analysable par l'expérimentateur.

La réponse est facilement interprétable lorsqu'elle est qualitative (différences entre objets par exemple). La réponse quantitative est plus compliquée, car elle utilise le sujet comme un instrument de mesure qui évalue l'intensité d'un descripteur et qui doit satisfaire aux exigences de la métrologie.

Grandeurs sensorielles

Une grandeur sensorielle peut prendre une des trois formes suivantes (Stevens, 1946) :

- Une grandeur nominale, simplement désignée par un nom particulier
- Une grandeur ordinale, située par rapport aux grandeurs de même nom grâce à l'attribution d'un rang. On parle aussi de grandeur repérable
- Une grandeur rationnelle, située par rapport aux grandeurs de même nom grâce à l'attribution d'un nombre rationnel. on parle aussi de grandeur repérable et mesurable

Ces grandeurs peuvent également être divisées en deux catégories. Les grandeurs simples représentées par un seul nombre et les grandeurs complexes qui sont la combinaison de grandeurs simples. Dans le domaine de la conduite il est difficile de mesurer, en situation, la perception d'une seule grandeur simple, comme une accélération latérale ou bien une vitesse de rotation. Il convient donc de créer des conditions particulières pour mesurer la perception d'un événement par le biais d'autres descripteurs qu'on supposera être une combinaison de grandeurs simples mesurables. Il

convient ensuite à l'expérimentateur d'utiliser ou de proposer des modèles pour décomposer ces descripteurs.

Echelles de mesures et références

Dans le domaine de la mesure des perceptions, les valeurs des échelles sont toujours positives ou nulles puisque qu'elles reflètent une quantité de stimulus perçue. Trois types d'échelle sont principalement utilisés en analyse sensorielle.

L'échelle de catégorie, définie par des chiffres, mots ou symboles qui forment des classes. Aucune opération mathématique ne peut être appliquée entre les classes. Elles peuvent être ordonnées ou non ordonnées. Dans le premier cas, on parle de grandeurs ordinales et d'échelle de cotation. Dans le second cas, on parle de grandeurs nominales.

L'échelle d'intervalle (ou échelle de repérage) a une origine arbitraire et repose sur l'égalité des distances entre les intervalles. Elle peut être structurée par des catégories numériques ou non structurée (segment de droite).

L'échelle proportionnelle a pour but de représenter le rapport entre deux sensations et implique donc l'indication d'une référence absolue. Les rapports entre les pas de l'échelle doivent être constants. Afin de déterminer la valeur numérique associée à une grandeur sensorielle, les sujets ont besoin d'avoir une référence.

Cette référence peut être de deux types :

- Référence construite, on utilise une gamme étalon
- Référence produit, on utilise l'ensemble des produits testés

En pratique il est plus difficile d'utiliser une référence construite car l'on retient d'autant plus facilement une sensation qu'elle est récente. Dans le cas d'une référence produit, on utilise donc le dernier produit testé comme référence.

1.2.3 Techniques d'évaluation des perceptions

Epreuve de classement

Cette méthode consiste à présenter un ensemble de stimuli à un sujet. Il doit ensuite les ranger par ordre d'intensité croissante ou décroissante. Cette méthode présente de nombreux avantages car elle est très simple et ne nécessite pas de référence. Elle est, de plus, rapide d'interprétation et indiscutable au niveau théorique (SSHA, 1998). Les résultats de cette épreuve sont des tableaux de rangs. Cependant

elle présente deux inconvénients majeurs. Elle ne permet de donner que des informations indirectes et relatives sur l'intensité des perceptions. Elle donne également une échelle unique par groupe d'expérimentation qui ne peut être comparée avec d'autres expériences.

Epreuve de cotation

Cette épreuve consiste à placer une série d'échantillon dans des catégories, ces catégories formant une échelle ordonnée. Les distances entre deux catégories adjacentes ne sont pas nécessairement égales. Cette épreuve diffère de l'épreuve de classement par le fait que tous les échantillons ne sont pas nécessairement évalués en même temps, le sujet est libre de consulter les échantillons qu'il veut avant de donner une réponse. Les catégories doivent être définies de manière précise soit par des échantillons de référence, soit par des représentations claires (images, dessin ou expressions). Les résultats sont des effectifs exprimant une fréquence d'appartenance à une catégorie. Ils sont interprétables au moyen d'un simple test de χ^2 .

Epreuve d'intervalle

Pour cette épreuve, des distances égales correspondent à des différences d'intensité perçue égale tout au long de l'échelle. Une échelle structurée peut être utilisée en fixant des « barreaux » qui doivent absolument être à distance égale les uns des autres. Cependant, ces barreaux peuvent avoir une influence et conditionner en partie les réponses des sujets. Le choix du nombre de barreaux est une question ouverte et doit probablement dépendre du nombre d'intensités élémentaires que le sujet peut distinguer. De plus les extrémités des échelles ont tendance à être évitées (SSHA, 1998). On peut également utiliser une échelle non structurée où seules les extrémités sont indiquées (segment de droite). Le sujet doit simplement placer l'échantillon selon l'intensité de la sensation perçue. On suppose que le sujet est capable de structurer lui-même l'échelle et de vérifier l'égalité des intervalles. Cette méthode nécessite un entraînement des sujets, de façon à ce qu'ils puissent utiliser l'échelle de façon linéaire et répétable, ainsi que la présence de références.

L'utilisation d'une épreuve d'intervalle requiert plus d'effort mental et d'attention de la part des évaluateurs. Dans le cadre de la conduite, on peut penser que cette épreuve conviendrait mieux à des conducteurs experts. En effet, on peut supposer que la conduite demande une charge mentale plus importante à des conducteurs « classiques » et ils sont donc moins concentrés sur les aspects du contrôle du véhicule pour produire une évaluation subjective. Cependant, rien ne le prouve à l'heure actuelle.

L'avantage majeur de l'utilisation d'une épreuve d'intervalle est que l'échelle utilisée permet d'obtenir des valeurs numériques absolues pour un descripteur donné. Ceci est très utile dans le cadre d'analyses, basées sur des statistiques paramétriques, dans lesquelles on souhaite relier les évaluations subjectives aux mesures objectives du comportement du véhicule. En effet, dans ces cas, la manipulation de grandeurs continues est requise.

1.2.4 Application à l'évaluation de la conduite automobile

Dans ses travaux, Chen (1997) a effectué une revue des études proposées sur l'évaluation subjective du comportement véhicule. La plupart de ces études étaient focalisées sur le seul cas du changement de voie. Toutefois les échelles de mesure, les méthodes et les scénarios étaient souvent très différents rendant les comparaisons difficiles. Il souligne ainsi le besoin de proposer des méthodologies plus standardisées pour améliorer les performances de ces mesures. Cela passe également par le développement de modèles de relation objectif/subjectif pertinents et fiables.

Le nombre de publication dans ce domaine est cependant assez limité. Ceci étant principalement dû au fait que les constructeurs ne communiquent que très peu sur leurs méthodes utilisées pour collecter les données subjectives. En effet, la mise au point d'un véhicule est un processus long et complexe. La mise en place de méthodes permettant de concevoir des véhicules fiables, robustes répondant aux attentes du client est un enjeu économique important pour les équipes d'ingénieries et peut être considéré comme un savoir-faire stratégique.

L'utilisation de conducteurs non-expert est encore rare dans les processus de conception. Cependant, Matsushita (1980) a discuté le fait que malgré leurs grandes compétences pour juger, les conducteurs experts pourraient avoir des préférences en termes de contrôle du véhicule différentes comparées à des conducteurs « normaux ». En outre les tendances actuelles visent à centrer de plus en plus la conception sur l'utilisateur. Bien qu'on puisse comprendre les difficultés pratiques à mettre en place des expérimentations avec des conducteurs non-experts, lors des phases amont de conception, l'utilisation de nouveaux outils tels que les simulateurs de conduite pourrait être une alternative sûre et fiable (voir *1.4 Les simulateurs de conduite*).

On peut également citer les travaux de Weir et DiMarco (1978) qui ont inclut dans leurs évaluations un conducteur expert et des conducteurs non-experts. Les résultats ont montré que le conducteur expert préférait un véhicule plus réactif comparé aux

conducteurs non-experts. Toutefois, le peu de sujets utilisés et la méthode d'acquisition différente des données subjectives limitent la portée de cette comparaison.

Plus récemment, des travaux sur l'évaluation des sensations lors du freinage ont été réalisés (Dairou et al., 2003). Ils ont permis la construction d'un modèle de prédiction du ressenti de freinage basé sur des paramètres techniques, utilisés pour spécifier différentes lois de commande de freinage. Dubart et al. (2007, 2008) ont utilisé les données recueillies sur 120 conducteurs non-experts dans une situation de conduite réelle. Ils ont ainsi pu développer un algorithme pour classifier les conducteurs et ainsi proposer des règles de spécifications pour la mise au point d'un système d'aide au contrôle longitudinal du véhicule.

Plus globalement, les méthodes d'analyses sensorielles ont été initialement développées pour répondre à des besoins dans le domaine de l'agro-alimentaire, de la cosmétique ou bien du textile. L'analyse subjective du comportement dynamique du véhicule nécessite des évaluations en conditions dynamiques. Les conducteurs doivent ainsi construire leurs jugements en même temps qu'ils agissent sur la tâche de conduite. On constate donc qu'il est nécessaire d'adapter ces méthodes pour évaluer les prestations d'un véhicule en situation dynamique.

1.3 Eléments de dynamique véhicule et système de correction de trajectoire

La caractérisation du comportement d'un véhicule en situation de conduite et des interactions avec son environnement répond à des lois complexes. L'objectif de cette section est de définir brièvement les éléments de physique et de technologie d'un véhicule afin de faciliter la compréhension des situations expérimentales. Le lecteur qui voudra approfondir ce domaine pourra consulter des références telles que (Gillepsie, 1992) ou (Reimpell, 2001).

1.3.1 Généralités sur la liaison au sol

Dans le domaine automobile, la liaison au sol regroupe tous les systèmes permettant d'assurer le contrôle de la trajectoire du véhicule. Elle regroupe les organes suivants :

- Les pneumatiques
- Les systèmes de freinage
- Les systèmes de direction
- Les essieux
- La suspension

Les grandeurs couramment rencontrées en dynamique véhicule et décrites par la suite sont les suivantes :

- L'accélération latérale γ_T et longitudinale γ_L
- Les angles de roulis, tangage et lacet : θ , ϕ , ψ (Figure 1.8)
- L'angle au volant A_{volant}
- La dérive des pneus δ_{pneu}
- La dérive au centre de gravité, à l'avant et à l'arrière du véhicule : δ_{CDG} , δ_{AV} , δ_{AR}
- Le coefficient d'adhérence μ
- Les forces verticales appliquées par les pneus sur le sol : F_{z1} , F_{z2} , F_{z3} , F_{z4}
- Les pressions de freinage sur chaque roue : P_1 , P_2 , P_3 , P_4

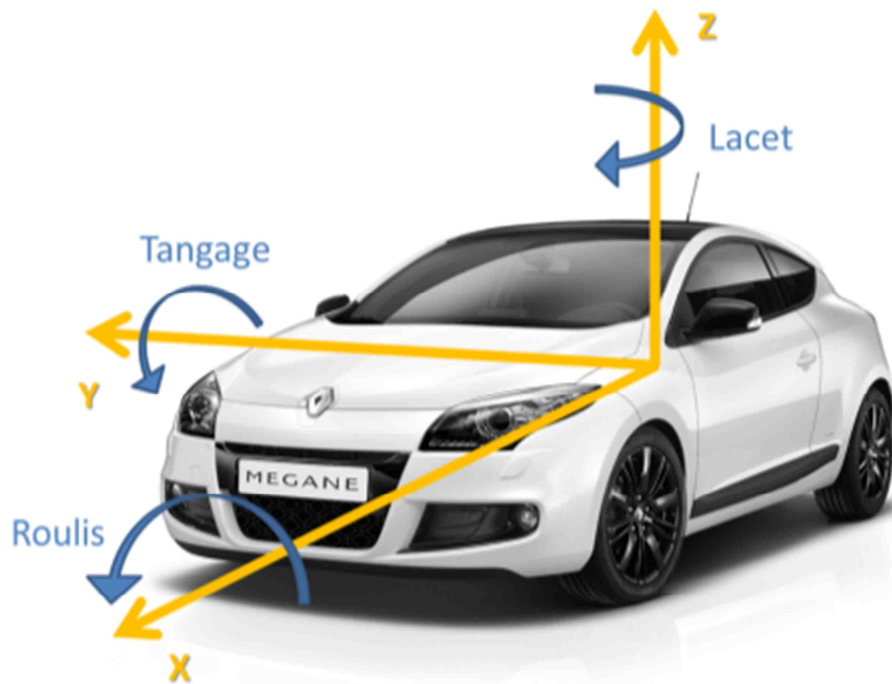


Figure 1.8: Définition des angles utilisés dans l'automobile

Notion de dérive du véhicule

La dérive d'un véhicule désigne l'angle formé entre son vecteur vitesse et son axe longitudinal (Figure 1.9). Il est calculé en utilisant l'arc tangent du rapport entre le vecteur vitesse selon Y et le vecteur vitesse selon X. Cette définition est identique pour chaque pneumatique ou chaque essieu. Les dérives des trains avant et arrière sont définies par rapport à un point situé au centre de chaque essieu. Ces deux grandeurs sont particulièrement importantes car elles déterminent le caractère sur-vireur ou sous-vireur du véhicule (voir ci-après). On entend par sous-vireur un véhicule qui aura tendance à s'éloigner de sa trajectoire vers l'extérieur du virage et un véhicule sur-vireur vers l'intérieur du virage.

Si un véhicule dérive c'est parce que ses pneumatiques sont capables de se déformer transversalement quand ils sont soumis à l'action d'une force latérale. C'est cette déformation qui donne également la capacité aux pneus de guider la voiture en transmettant les forces au sol. Mais cette capacité à se déformer a ses limites et quand les forces transversales deviennent trop importantes, le pneumatique rentre dans sa zone de glissement. La quantité d'effort transversal que le pneu peut supporter dépend, pour une vitesse donnée, du coefficient d'adhérence pneu/sol (Figure 1.10).

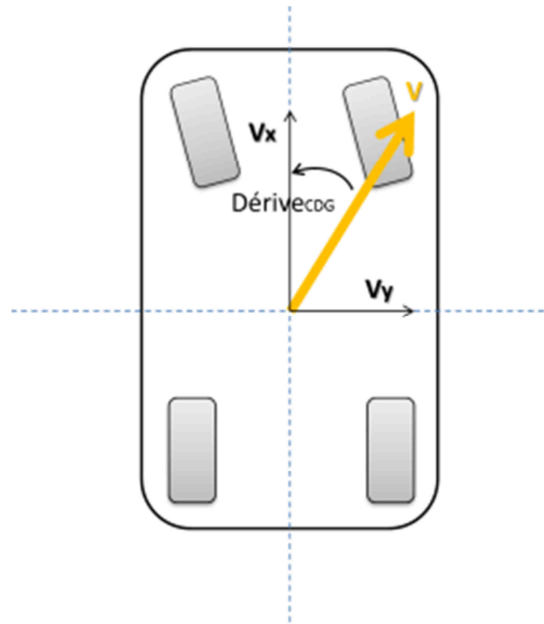


Figure 1.9: Angle de dérive au centre de gravité du véhicule

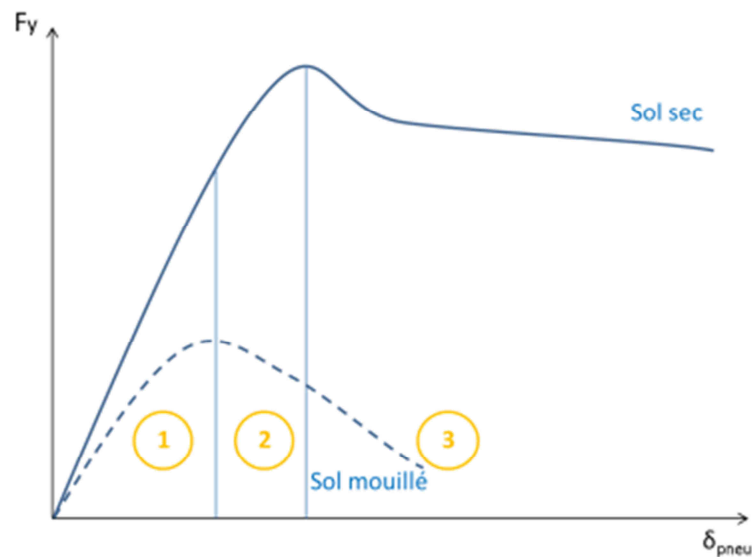


Figure 1.10: La représentation des forces transversales en fonction de l'angle de dérive du pneu donne ses zones de fonctionnement. (1) zone linéaire croissante (adhérence), (2) zone non-linéaire croissante (pseudo-glisement), (3) zone décroissante (Glissement).

Dynamique angulaire

Soit R le rayon d'un cercle sur lequel se déplace le véhicule à vitesse constante V . On a, $a_c = R \cdot \ddot{\psi}$, où $\ddot{\psi}$ est la vitesse de lacet autour de l'axe vertical passant par le centre de gravité, et $\gamma_T = \frac{V^2}{R}$. On définit E_{AV} et E_{AR} les empattements avant et arrière qui correspondent à la distance entre le centre de gravité du véhicule et les milieux des trains avant et arrière. On définit δ_{volant} le braquage des roues avant donné par la rotation du volant. Si δ_{ack} est l'angle de braquage du train avant pour que le véhicule

suive le cercle R à une vitesse V sans dériver ni de l'avant ni de l'arrière, on a l'expression suivante :

$$\delta_{ack} = \frac{E_{AV} + E_{AR}}{R} = \frac{\psi E}{V} = \delta_{AR} - \delta_{AV} \quad (\text{Equation 1.3})$$

Soit SB, l'angle de sur-braquage au volant à appliquer pour suivre le cercle R à vitesse V constante, définit par l'équation suivante :

$$SB = \delta_{volant} - \delta_{ack} = \delta_{volant} + \delta_{AV} - \delta_{AR} \quad (\text{Equation 1.4})$$

Si l'angle volant à appliquer est supérieur à δ_{ack} , alors le sur-braquage est positif et le véhicule est dit sous-vireur. A l'inverse, le véhicule est dit sur-vireur (Figure 1.11).

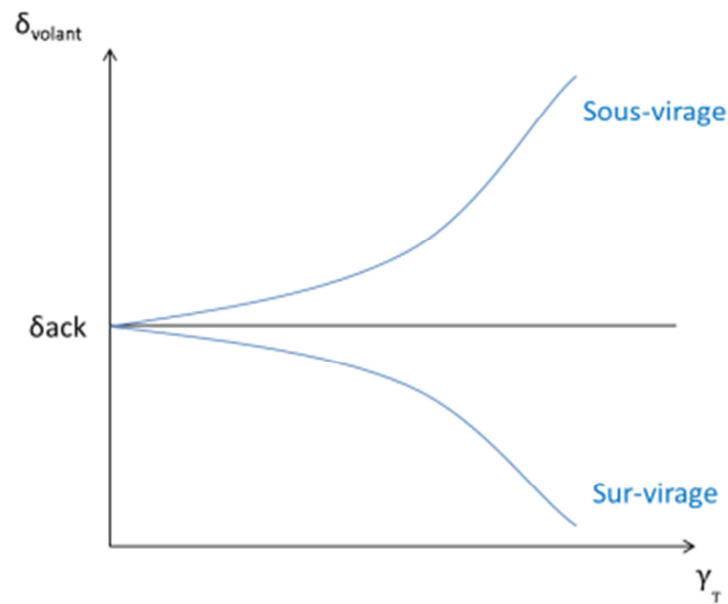


Figure 1.11: Braquage des roues pour suivre le cercle R en fonction de l'accélération latérale

Les paramètres intrinsèques d'un véhicule définissent la tendance générale à ce qu'il se comporte plutôt de façon sur-vireur ou sous-vireur lors d'un virage. En pratique, la différence de dérive entre les trains arrière et avant est également fortement influencée par la différence d'adhérence au sol des pneus arrière et avant.

Systèmes de freinage

Le système de freinage d'un véhicule est composé des éléments suivants (Figure 1.12) :

- Une pédale de frein
- D'une assistance pneumatique (servofrein)
- D'un maître-cylindre

- Un système de frein à disque ou à tambour



Figure 1.12 : Organes du système de freinage

Les puissances de freinage sont généralement réparties différemment selon l'avant et l'arrière afin d'optimiser le freinage. En effet, lors d'un freinage il y a un transfert de charge de l'arrière vers l'avant qui entraîne une augmentation de la force F_z appliquée au pneu. La capacité du pneu à adhérer à la route et transmettre la force de freinage étant directement liée à F_z , on applique souvent une force de freinage plus importante sur l'avant que sur l'arrière pour faire en sorte que tous les pneus travaillent avec la même adhérence. Ceci s'applique pour la plupart des véhicules de séries qui sont généralement à traction avec un moteur à l'avant.

Cette répartition, souvent assurée par un système mécanique, tend aujourd'hui à être pilotée électroniquement, notamment depuis la généralisation des systèmes ABS et ESC (voir plus loin).

Le système ABS (antiblocage de sécurité), est un système d'assistance de freinage. Il empêche le blocage des roues pendant les périodes de freinage afin que celles-ci conservent leurs capacités de guidage du véhicule. L'ABS est composé d'un calculateur qui reçoit des données sur la vitesse de chaque roue via des capteurs. Lorsque le calculateur reçoit une information de roue bloquée, il va diminuer la pression

de freinage, en pilotant des électrovannes, afin d'empêcher le blocage de la roue. Avec ce système, on peut ainsi piloter la pression de freinage de chaque roue individuellement. Le déclenchement du système reste contraint par l'appuie sur la pédale de frein et ne prend donc pas la décision de freiner à la place du conducteur.

1.3.2 Le système ESC

Description et action sur le comportement véhicule

L'ESC est un système électronique de correction de trajectoire destiné à améliorer le contrôle de la trajectoire du véhicule en situation critique. Il a été développé par l'équipementier Bosch© en 1995. L'ESC est un système complexe basé sur un calculateur qui reçoit différentes informations via des capteurs (Vitesse de lacet, accélération latérale, angle volant) afin de déterminer la trajectoire voulue par le conducteur et la trajectoire réelle du véhicule (Figure 1.13). Le principe de base est simple, si la trajectoire réelle du véhicule diffère trop de la trajectoire désirée par le conducteur, le système va s'enclencher afin de corriger cette trajectoire. Il agit sur le freinage au travers de l'ABS et sur le régime moteur.

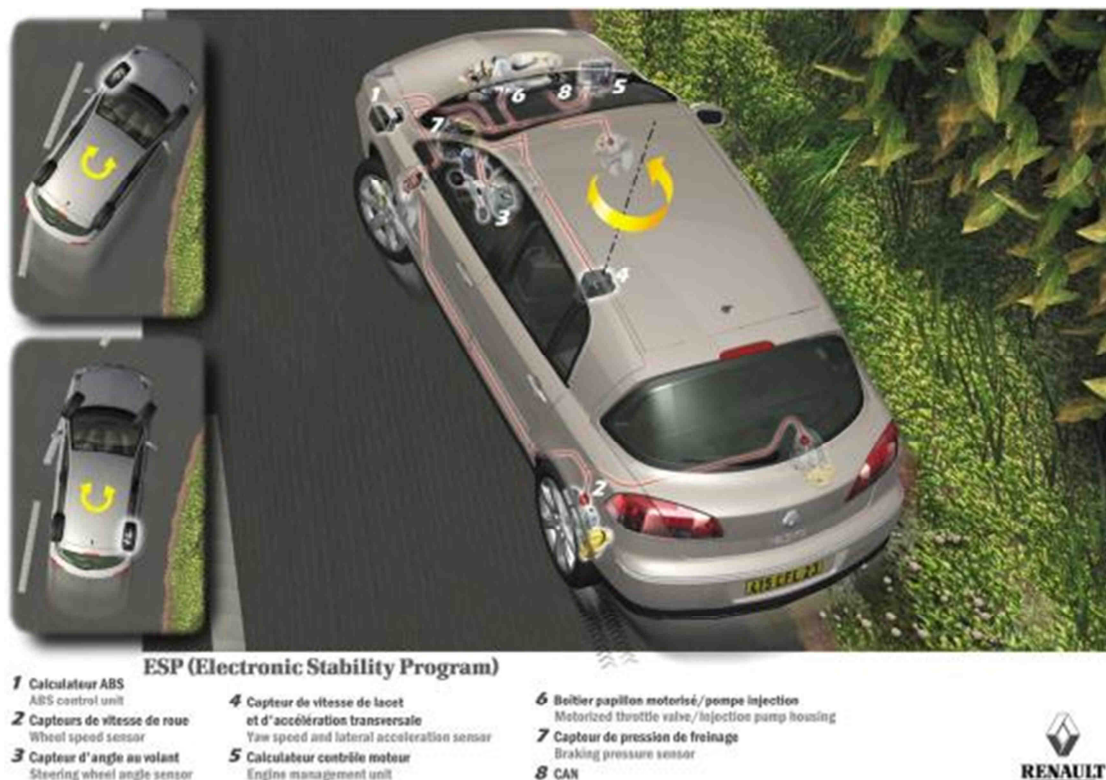


Figure 1.13: Les composants du système ESC

Lorsque qu'un véhicule est en mouvement, plusieurs forces s'appliquent sur lui. Lors d'un virage ou par l'action d'un coup de vent, des forces latérales vont s'appliquer.

L'action de ses forces génère des couples selon les trois axes du véhicule qui créent des transferts d'appui entre les roues du véhicule. En théorie, on peut donc modifier la trajectoire du véhicule en jouant sur ces forces. L'ESC va modifier l'état de ses forces en appliquant des forces de freinage afin de modifier le couple de lacet et ainsi le sens de rotation autour de l'axe vertical du véhicule. Il en résulte une modification de la trajectoire du véhicule.

Prenons l'exemple d'un véhicule arrivant en survitesse dans un virage. Le conducteur aura tendance à augmenter la quantité d'angle au volant pour suivre sa trajectoire. Cette action va entraîner des forces latérales sur les pneus avant qui vont dépasser les capacités de déformation du pneumatique qui va entrer en zone de glissement. Le véhicule aura donc tendance à quitter sa trajectoire vers l'extérieur du virage. L'ESC va réagir en freinant la roue arrière intérieure au virage pour créer un couple de lacet qui va ramener le véhicule sur sa trajectoire. En fonction de l'importance de la situation à corriger, le système pourra également tenter de freiner les roues avant et diminuer le régime moteur (Figure 1.14). Le pilotage du freinage via le système ABS va ainsi profiter au maximum de l'adhérence sur chaque roue pour contrôler la trajectoire du véhicule.

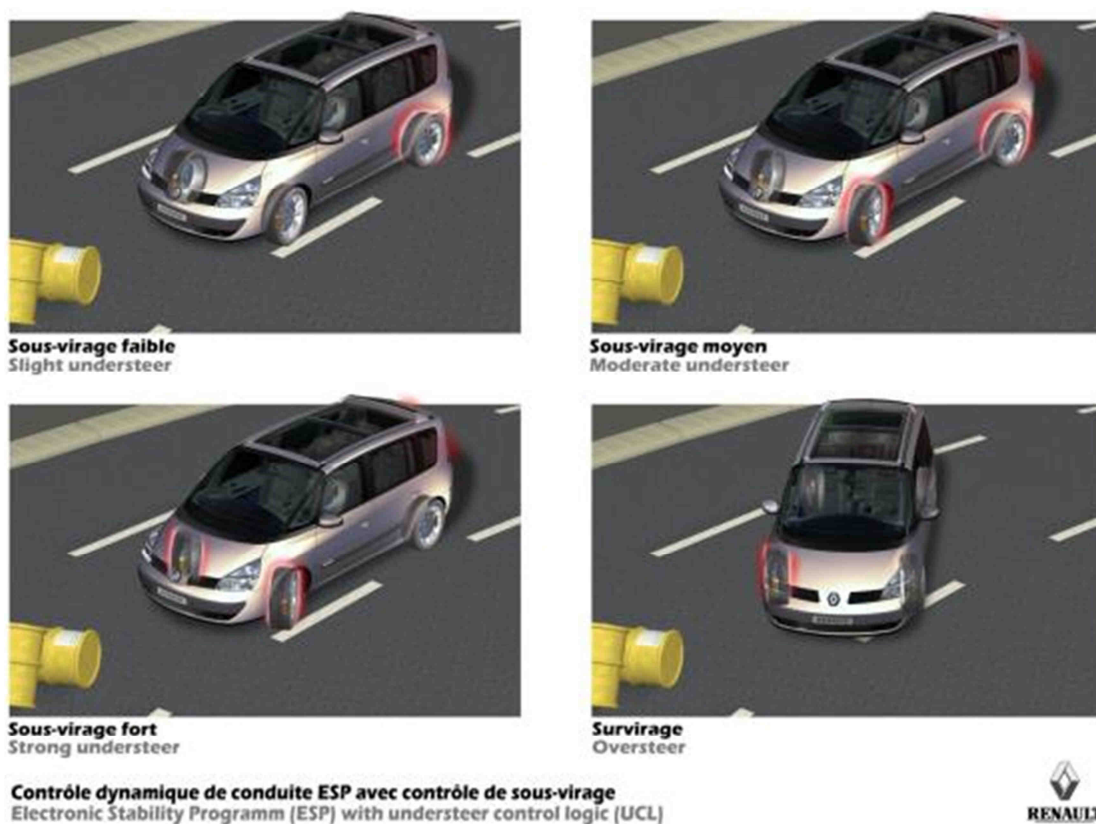


Figure 1.14: Intervention d'un ESC selon la situation

Aspects sécuritaires

L'administration suédoise pour les transports a étudié les données sur les accidents en Suède de 1998 à 2004 pour évaluer l'efficacité de l'ESC. Il en ressort que l'ESC permet d'éviter 16.7% des accidents, excepté les collisions par l'arrière. L'efficacité concernant les accidents sérieux et mortels est de 21.6%. Dans des situations de perte de contrôle, sur route mouillée, ce chiffre s'élève à 56.2% et sur route enneigée à 49.2% (Lie et al, 2005).

Cette efficacité sur les routes suédoises est tempérée par celle sur les routes anglaises. Pour des données de 2002 à 2004 étudiées par l'université de Loughborough, on note une efficacité de 3% sur l'ensemble des accidents. Cette efficacité est portée à 25% quand on circule sur route verglacée ou enneigée, mais cela ne représente que 2% des accidents (Thomas, 2006)

Pour la France, une étude a été réalisée par le LAB (Laboratoire d'accidentologie et de biomécanique dirigé en collaboration par PSA et Renault) en 2006 sur un panel de 588 Laguna I et II impliquées dans différents accidents. Si l'ensemble des véhicules en circulation étaient équipés de l'ESC, le bénéfice serait de 16% pour les accidents mortels et de 10% pour les autres accidents avec des blessés (Page et al, 2006).

La National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), administration américaine pour la sécurité routière, estime que l'installation de l'ESC sur tous les véhicules permettrait de réduire de 26% le nombre d'accidents impliquant un seul véhicule et plus particulièrement de 48% pour les SUV sur le même type d'accident. L'ESC peut également potentiellement éviter 64% des retournements de voitures et 85% pour les SUV dans les accidents impliquant un seul véhicule (Dang et al, 2007).

L'institut de recherche sur les transports de l'université du Michigan a étudié les effets et l'efficacité de l'ESC sur des SUV aux U.S.A. Cette étude utilise des données qui proviennent du NASS General Estimate System (administration américaine) qui classe les accidents en fonction du type de crash et définit un niveau de perte de contrôle pour chaque accident. Cela permet de catégoriser les résultats en sachant que l'ESC agit principalement sur les situations de perte de contrôle. On a une diminution estimée des accidents de 70.3% grâce à l'ESC. L'ESC a également beaucoup plus d'effets sur route mouillée que sur route sèche, 88.2% d'accidents en moins contre 52.5% (Green et al, 2006).

Les différentes études sur l'efficacité de l'ESC s'attachent chacune à montrer les effets bénéfiques de l'ESC dans une situation particulière, avec un type de véhicule particulier ou bien pour un type d'accident. Toutes ces études cherchent à démontrer

l'efficacité de l'ESC dans des situations accidentogènes. Les facteurs tels que la fatigue, la visibilité réduite, la consommation d'alcool ou drogue, ou bien le comportement du conducteur juste avant l'incident ne sont pas faciles à prendre en compte et influent sur le résultat des études. La proportion d'accidents qui peuvent être évités grâce à l'ESC est donc légèrement surévaluée (Erke et al, 2008 ; Green et al, 2006).

Bien que l'efficacité de ce système semble établie, il reste encore un équipement non standard dans beaucoup de gammes véhicule (Durisek & Granat, 2008). Les législateurs européens et nord-américains ont ainsi décidé de rendre ce système obligatoire pour tous les nouveaux véhicules à partir de 2012. Cette disposition apporte de nouvelles contraintes pour les constructeurs dans leurs processus de conception.

Conception et mise au point

Les fournisseurs proposent peu de modèles différents mais leur marge de manœuvre est importante. Les réglages effectués sur les lois de commande peuvent ainsi induire un comportement allant du tout sécuritaire au tout permissif en fonction du type de véhicule (sportif, familiale, ...).

A l'heure actuelle, le processus de développement des systèmes ESC s'appuie principalement sur des essais physiques réalisés sur piste d'essai en adhérence normale et réduite (glace) nécessitant des campagnes hivernales coûteuses. Les contraintes économiques fortes sur le secteur automobile poussent les constructeurs à améliorer leur processus de conception et à réduire les délais de développement. Ces contraintes se traduisent notamment par la réduction du nombre d'essais physiques et le développement des outils de simulation numérique. L'utilisation des simulateurs de conduite peut ainsi présenter une alternative sûre et fiable mais nécessite néanmoins le développement de méthodologies d'usages adaptées pour mettre au point des simulations performantes et compétitives par rapport aux essais réels.

1.4 Les simulateurs de conduite

La simulation de conduite est un domaine de recherche pluridisciplinaire, qui a connu son essor dans les années 70. On peut définir les simulateurs de conduite comme des systèmes complexes associant une partie matérielle et une partie logicielle, permettant de reproduire artificiellement des sensations de mouvement. Ils utilisent des techniques issues du domaine de la réalité virtuelle afin d'immerger le conducteur dans une expérience multisensorielle pour représenter des situations de conduite (Filliard, 2010). Dans cette section, nous présenterons un bref historique du développement des simulateurs et leurs différents types. Nous évoquerons ensuite les techniques utilisées pour restituer les informations sensorielles. Enfin, nous présenteront quelques applications en rapport avec cette étude.

1.4.1 Généralités

Historique

L'histoire des simulateurs a débuté avec la simulation de vol au début du siècle. Dès 1910, « le tonneau Antoinette » (Figure 1.15), a été construit par la société Levavasseur. C'était un poste de pilotage monté sur rotule et actionné manuellement afin de permettre aux pilotes de s'entraîner aux manœuvres de base. Le premier simulateur de vol instrumenté est réellement apparu en 1929 avec le « Link Trainer ». Il était constitué d'une cabine posée sur un mécanisme électro-pneumatique permettant de restituer des mouvements selon 3 axes en fonction des commandes du pilote.



Figure 1.15: Le tonneau Antoinette



Figure 1.16: Sensorama Simulator

Le premier simulateur de conduite est apparu en 1962. Le « Sensorama Simulator » (Figure 1.16), conçu par Morton Heilig, reproduisait une conduite passive en moto dans les rues de New-York. Il restituait les informations visuelles sur large écran stéréoscopique, les informations de mouvements par des vibrations du siège, un son spatialisé et même des sensations de température et d'odeurs.

General Motors fut le premier constructeur automobile à proposer l'utilisation des simulateurs pour l'étude et la conception des véhicules. Il mit au point en 1973, le premier simulateur de conduite interactif utilisant à la fois un système visuel et un système de rendu de mouvement.

Depuis, les simulateurs de conduite ont largement été déployés chez tous les constructeurs et dans les laboratoires de recherche. Ils ont connus de nombreuses améliorations, bénéficiant notamment des avancées en informatique, en robotique et en modélisation du véhicule. On peut présenter en exemple le dernier modèle de simulateur mis au point par Toyota (Figure 1.17). Il est constitué d'un dôme restituant une information visuelle sur 360°, monté sur une plateforme de type Gough-Stewart et sur des rails permettant un déplacement sur une surface de 700m² (35 x 20 m). Pour un historique plus détaillé des simulateurs de conduite, nous renvoyons le lecteur à (Reymond, 2000 ; Dagdelen, 2005 ; Elloumi, 2006 et Vailleau, 2010).

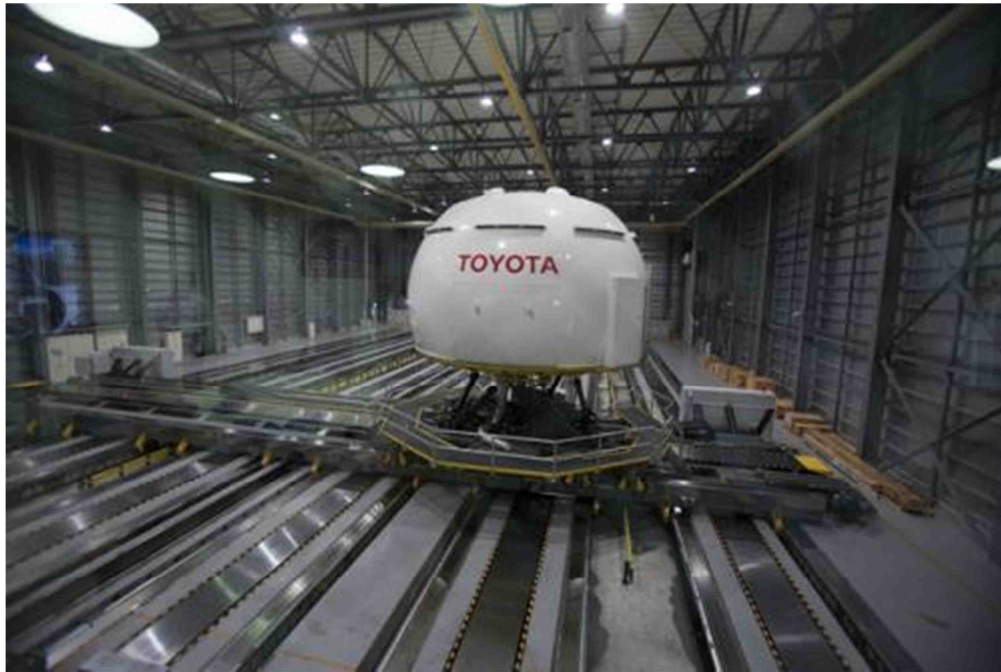


Figure 1.17: Simulateur Toyota

Classification

Du point de vue de la restitution du mouvement, on peut catégoriser les simulateurs en deux grandes familles. La première regroupe les simulateurs dits « statiques » qui ne fournissent pas d'informations inertielles. Ils sont généralement utilisés pour évaluer l'ergonomie des systèmes, l'architecture d'un véhicule ou bien l'éclairage.

La seconde regroupe les simulateurs dits « dynamiques » qui fournissent des informations inertielles. Plus de détails sur les technologies utilisées sont présentés dans un paragraphe suivant sur la restitution inertielle. Ils sont principalement utilisés dans des études qui impliquent des variations dans la dynamique du véhicule.

Elloumi (2006) a proposé dans ces travaux une classification des simulateurs plus détaillée en fonction du potentiel mécanique du système de mouvement :

- Rudimentaires, sans cabine et basés uniquement sur l'environnement de réalité virtuelle.
- A cabine fixe (Figure 1.18)
- A cabine vibrante
- Basés sur une plateforme de type Gough-Stewart (Figure 1.22), dits « haute fidélités ». On peut les classer en 2 sous catégories :
 - Hexapode seul (Figure 1.20)

- Hexapode posé sur des rails (Figure 1.19)
- A plateforme de mouvement composée d'un robot ayant une structure spécifique (Figure 1.21)



Figure 1.18: Simulateur d'éco-conduite RENAULT fourni par la société OKTAL



Figure 1.19: Simulateur ULTIMATE RENAULT



Figure 1.20: Simulateur du laboratoire LAMIH à Valenciennes



Figure 1.21: Simulateur DESDEMONA de la société TNO (Pays-Bas)

Malgré les incroyables capacités que peuvent offrir de telles machines, les simulateurs de conduite ont leurs limites. Tout d'abord, il y a des limitations technologiques liées aux caractéristiques des systèmes utilisés (qualité de projection des images, qualité du son, temps de réactions des actuateurs, vitesse des rails, etc...). Ces limitations évoluent au fil de l'avancement de la technologie et sont sans cesse repoussées. D'autre part, il y a des limitations mécaniques. En effet, contrairement à une voiture qui peut rouler sur une route infinie, les simulateurs sont « bloqués » dans une enveloppe liée aux caractéristiques mécaniques des plateformes et des rails. Il est donc nécessaire de mettre en place des stratégies de restitution de mouvement qui permettent de simuler une perception de mouvement allant au-delà de ces limitations mécaniques. Les simulateurs ne pouvant pas reproduire à l'identique la conduite réelle

dans sa globalité il est également primordial de mettre des méthodologies d'usage adaptées au type de simulateur et aux situations à évaluer.

1.4.2 Restitution des informations sensorielles

Comme nous venons de le voir, la finalité des simulateurs de conduite n'est pas nécessairement de reproduire à l'identique toutes les informations sensorielles nécessaires à la perception du mouvement. La conception d'un simulateur est régie par des compromis entre les technologies disponibles, leur coût et les besoins pour les cas d'usage finaux. Nous présentons ici des méthodes de restitution visuelles et inertielles⁵.

Restitution visuelle

La projection d'images sur des écrans larges est largement exploitée dans la simulation de conduite. Les systèmes rencontrés peuvent aller de simple écrans (type ordinateur de bureaux) à des systèmes de projections multi-faces complexes formant une « bulle » d'image autour de l'utilisateur (type CAVETM ou dômes de projection). L'affichage peut être stéréoscopique afin de renforcer l'immersion mais nécessite l'utilisation de lunettes adaptées. Le choix du système de projection repose sur plusieurs critères, la qualité de l'image, le champ de vision ou bien le délai d'affichage.

Afin d'assurer un délai d'affichage correct, on utilise généralement une fréquence de rafraichissement de 60 Hz (ou 120 Hz dans le cas de la stéréoscopie). L'évolution des technologies tend, aujourd'hui, à généraliser l'utilisation d'affichages haute définition.

Afin d'assurer un champ de vision le plus large possible tout en conservant une bonne qualité d'image, la méthode la plus répandue consiste à juxtaposer plusieurs projecteurs sur un ou plusieurs écrans. L'utilisation de surface plane est la façon la plus simple en terme de calibration mais fait apparaître des arrêtes qui peuvent générer des discontinuités dans l'affichage. L'utilisation d'écrans cylindriques ou de dômes permet d'assurer une meilleure continuité d'affichage mais nécessite des méthodes de calibrations et de déformations d'images plus complexes à mettre en place. Pour plus de détails sur les systèmes d'affichage et la synthèse d'image, nous renvoyons le lecteur vers les travaux de thèse de Lefebvre (2007) et Filliard (2010).

⁵ Bien que la restitution sonore soit une composante importante pour la sensation d'immersion et la perception de vitesse, elle sort du cadre de cette thèse et sera pas abordée.

Restitution inertielle

Plateformes

La forme la plus courante de restitution d'information inertielle consiste à placer le poste de conduite sur une plateforme mue par un système de vérins. Ces plateformes utilisent, le plus souvent, une architecture dite « Gough-Stewart » (Stewart, 1965). Cette architecture (Figure 1.22) permet de générer des rotations et des translations selon les trois axes de l'espace. C'est pourquoi le terme plateforme « six-axes » est également utilisé. Cependant, elle n'autorise qu'un espace de travail limité, principalement en translation. Les dernières générations de simulateurs haute-fidélité utilisent donc une architecture plus complexe où la plateforme est posée sur un ou des rails afin augmenter l'espace de travail longitudinal et transversal. C'est notamment le cas du simulateur ULTIMATE du centre technique de simulation RENAULT utilisé dans le cadre expérimental de nos travaux.

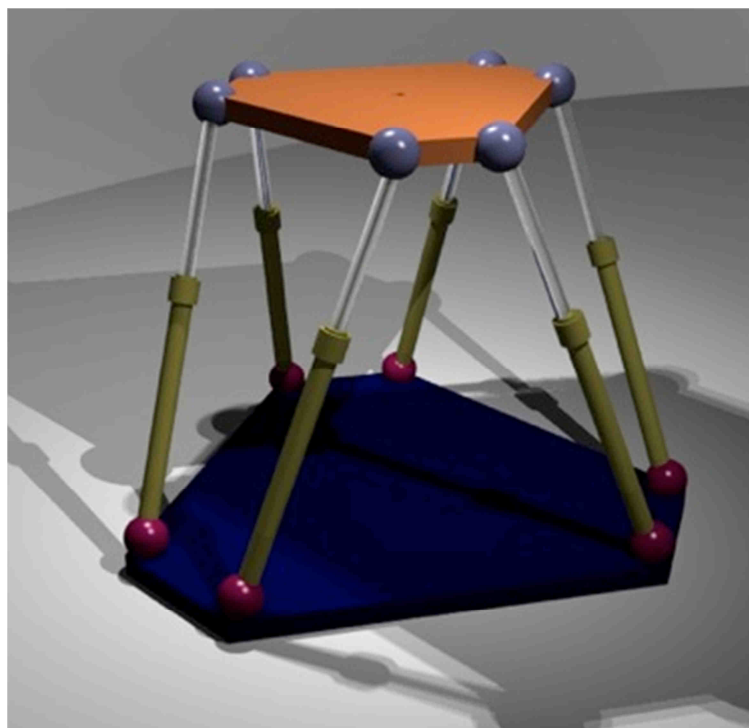


Figure 1.22: Plateforme de type Gough-Stewart

Stratégies de commandes

Les limites physiques des plateformes de restitution empêchent donc de reproduire à l'identique les accélérations d'un véhicule réel. Il est donc nécessaire de mettre en place des stratégies de commande, ou algorithmes, pour optimiser leurs déplacements. On peut distinguer deux grands cas, les accélérations transitoires et les accélérations soutenues.

Les accélérations transitoires peuvent généralement être reproduites dans l'espace de travail du simulateur. Dans le cas d'ULTIMATE, la largeur des rails (7 mètres) permet de reproduire à l'identique les accélérations d'un changement de voie ou d'un slalom entre 2 voies de circulations de taille standard (3,50 m pour les routes principales). Bien qu'il soit intéressant d'un point de vue mécanique de reproduire les mouvements à l'échelle 1, Filliard et al. (2009) ont démontré que l'utilisation de facteurs d'échelle améliorerait la perception du mouvement.

Plus généralement, lors de l'exploration d'un environnement routier, le conducteur est amené à effectuer plusieurs virages du même côté ou maintenir une accélération. Afin de pouvoir restituer le plus souvent les accélérations transitoires, il convient de mettre en place une stratégie qui ramène le plus souvent, la plateforme dans une position centrale. Ce principe est dit de « washout ». Cependant le mouvement de « washout » ne doit pas être détecté par le conducteur sous risque de provoquer des conflits sensoriels.



Figure 1.23: Principe du tilt-coordination (source : Vailleau 2010)

Les accélérations soutenues peuvent être reproduites en utilisant le principe du « tilt coordination ». Il consiste à restituer une partie des accélérations latérales et longitudinales en inclinant la plateforme dans le sens voulu. Cette stratégie permet d'utiliser l'accélération gravitationnelle pour stimuler les récepteurs sensoriels vestibulaires et simuler l'accélération du véhicule (Figure 1.23). Cette inclinaison doit s'effectuer en dessous des seuils de perception des vitesses angulaires. De plus, Malaterre et Fréchaux (2001) recommandent de ne pas dépasser un angle de 25°.

Une étude détaillée des stratégies de commande pourra être consultée dans les travaux de Dagdelen (2005).

1.4.3 Applications

Les simulateurs présentent plusieurs avantages par rapport à une conduite sur route ou bien des essais sur piste. Tout d'abord, ils permettent de réaliser des

expériences dans des situations où la variabilité des conditions (climatiques, trafic routier, etc ...) est maîtrisée et répétable. Ils peuvent également reproduire des situations dangereuses qui pourraient mettre en danger la vie du conducteur dans la réalité. Enfin ils permettent de réaliser des économies importantes dans les processus de conception en remplaçant certains essais et prototypes physiques. Concernant notre étude, l'utilisation d'un simulateur de conduite peut nous permettre de générer un éventail très large de perte de contrôle dues à des défaillances ou bien aux conditions environnementales. Cependant, ils restent contraints par le développement de modèles numériques (pneumatiques, amortissement, trains, etc...) représentatifs des efforts physiques étudiés.

Des systèmes d'aide au contrôle de la trajectoire du véhicule ont déjà été développés et testés sur simulateur de conduite. On peut citer à titre d'exemple les travaux de Navarro et al. (2008) qui a évalué sur simulateur un système d'avertissement générant des impulsions dans le volant afin de prévenir les sorties de voie. Une évaluation subjective de ce système a permis d'en juger l'acceptabilité par des conducteurs non-experts et ainsi fournir des informations en phase amont de la conception, bien avant la disponibilité de prototypes physiques.

Un système similaire a également été développé par Mas et al (2011) et évalué dans une situation accidentogène. Cette étude a permis d'évaluer le comportement et les réactions des conducteurs face au déclenchement du système dans ces situations.

Dans le cadre des études sur les performances de l'ESC, des travaux ont été réalisés sur le simulateur hautes performances du National Advanced Driving Simulator (NADS) à l'université de l'Iowa.

Watson et al. (2006) ont proposé cinq scénarios différents adaptés à l'étude de l'efficacité de l'ESC. Ces scénarios nécessitaient une réaction rapide du conducteur pour éviter l'incursion d'un véhicule venant de la droite, l'incursion d'un véhicule venant de la gauche et l'apparition d'un objet sur la route. Les deux autres scénarios nécessitaient une correction de la trajectoire du véhicule suite à un violent coup de vent et un virage qui se referme (diminution rapide de l'angle de courbure). Ces scénarios étaient tous réalisés avec un coefficient d'adhérence représentant une route très humide. La pertinence de ces scénarios a été discutée du point de vue de la difficulté technique d'implémentation et du point de vue de l'effet de la présence d'un système ESC sur la capacité des conducteurs à maîtriser la trajectoire de leur véhicule. Ils ont par exemple noté que pour optimiser la répétabilité du scénario en courbe, le respect d'une vitesse d'entrée similaire pour tous les sujets était nécessaire.

Afin de quantifier l'efficacité de l'ESC, Papelis (2006), a développé un algorithme basé sur les angles de dérive et de lacet. Cet algorithme qualifie différentes situations en tant que perte de contrôle ou non et évalue ainsi la capacité de l'ESC à les éviter. L'utilisation des scénarios précédemment décrits ainsi qu'un algorithme de détection des pertes de contrôle du véhicule a permis de démontrer de façon empirique l'efficacité de l'ESC sur simulateur de conduite (Papelis et al., 2010). Les résultats obtenus dans cette étude ont été proches de ceux estimés statistiquement par des études accidentologiques en Europe et aux US. Ils permettent donc de réaffirmer l'utilité de l'ESC pour réduire significativement le nombre de blessés et de tués sur la route. Les résultats obtenus permettent également de valider la pertinence de l'utilisation des simulateurs de conduite comme outils de développement des systèmes d'aide au contrôle de la trajectoire.

Toutefois, la définition de méthodologies d'usages adaptées aux simulateurs reste encore incomplète. A notre connaissance, la littérature ne présente pas d'études dont le but est d'évaluer subjectivement, sur simulateur, la perception des conducteurs face au déclenchement d'un ESC. Pourtant, l'utilisation des simulateurs pourrait être utile dans le processus de spécification technique de l'ESC et pour évaluer comment des conducteurs non-experts perçoivent différents réglages. Cela représente des gains potentiels en termes de coûts mais également en termes de qualité de prestation.

CHAPITRE 2

Construction d'une méthodologie d'étude de la perception des pertes d'adhérence en simulateur

2.1 Evaluation subjective de pertes d'adhérence en virage

L'objectif de cette étude était, d'une part, d'évaluer comment les conducteurs réagissent et perçoivent des épisodes de perte d'adhérence en virage sur simulateur. D'autre, part, cette première expérience avait aussi pour but de construire une méthodologie d'évaluation des pertes d'adhérence et plus généralement des perturbations de trajectoire.

Pour rester dans des conditions expérimentales proches d'une conduite réelle, il est très difficile de manipuler individuellement les paramètres dynamiques du véhicule (comme l'accélération latéral ou bien la vitesse de lacet) sans créer d'incohérences. Nous avons donc choisi de manipuler des paramètres environnementaux, le coefficient d'adhérence au sol et la surface de la zone où l'adhérence est réduite (Figure 2.5) pour induire des modifications dans le comportement dynamique du véhicule. A vitesse constante, la surface de cette zone correspond à un temps d'adhérence réduite. La manipulation de ces deux paramètres, intensité (coefficient d'adhérence) et durée, nous a permis de créer une gamme de pertes d'adhérence. Le plan d'expérience a été construit lors d'essais préliminaires pour définir un éventail de paramètres induisant des perturbations suffisamment perceptibles mais n'entraînant pas de pertes de contrôle totales du véhicule.

Par ailleurs, le choix de la manipulation de ces deux paramètres ne présente pas qu'un intérêt méthodologique. Il nous a également permis de déterminer si les conducteurs non-experts étaient capables de correctement discriminer ces deux déterminants et donc les différentes situations présentées.

Le recueil des évaluations subjectives a nécessité le développement d'un questionnaire adapté (Table 2.1). Les différents items ont été choisis afin de permettre l'analyse subjective des différentes situations selon des aspects émotionnels (danger, peur), perceptifs (intensité, durée, mouvement visuel, etc...) et de contrôle perçu (maîtrise). Le niveau de vocabulaire utilisé est délibérément généraliste afin d'être compréhensible par des conducteurs dits « ordinaire » et non spécialiste des termes techniques couramment utilisés pour décrire finement le comportement dynamique d'une voiture. La définition finale des questions est le résultat d'échanges verbaux suite à des pré-tests destinés à s'assurer que les formulations choisies soient suffisamment compréhensibles et communément interprétées.

2.1.1 Introduction

Les pertes d'adhérences en virage dues à une vitesse excessive ou une altération de la tenue de route peuvent entraîner des pertes de contrôle qui sont responsables de nombreux accidents. Les conséquences de ces situations peuvent être limitées par l'utilisation de systèmes électroniques de contrôle de la stabilité (ESC) qui corrigent la trajectoire du véhicule selon les intentions du conducteur et, des informations dynamiques du véhicule comme l'accélération latérale, la vitesse de lacet ou l'angle de dérive. La mise au point de tels système nécessite habituellement l'utilisation de prototypes physiques et de pilotes experts sur des terrains spécifiques. Par conséquent, les simulateurs de conduites sont utilisés pour étudier des situations de pertes d'adhérence et la performance de ces systèmes (Papelis et al, 2010). Ils permettent entre autre d'explorer des situations critiques en toute sécurité avec des sujets « non-experts » et en contrôlant les biais environnementaux (Kemeny, 2009).

Bien que les réglages de ces systèmes, et plus généralement du comportement dynamique du véhicule, soient principalement basés sur des critères objectifs (notamment pour la sécurité), une dimension subjective est également prise en compte afin d'orienter le typage d'un véhicule. Par exemple, un client d'un véhicule de type monospace familial souhaitera certainement un réglage corrigeant le moindre défaut de trajectoire pour assurer un meilleur confort et sentiment de sécurité à ces passagers. Au contraire, un client d'une voiture de gamme sportive souhaitera certainement plus s'approcher des capacités limites de son véhicule, et percevra le déclenchement prématuré du système comme trop intrusif. Il est donc utile de pouvoir connaître et prédire comment les conducteurs perçoivent des situations critiques comme les pertes d'adhérence.

Par ailleurs, les pertes d'adhérence induisent un changement brutal de la trajectoire du véhicule auquel le conducteur doit apporter une réponse adaptée pour rester sur la route. De nombreux modèles sensorimoteurs ont été proposés pour expliquer comment les conducteurs utilisent les diverses informations sensorielles pour guider leur véhicule en condition normale (Donges 1978, Reymond et al 2001, Toffin et al 2007), mais peu de choses sont connues dans le cas des pertes d'adhérence (CHAPITRE 1). Evaluer dans un même temps le contrôle de la trajectoire du véhicule et les réponses subjectives associées pourrait donc être une voie pour explorer comment les informations sensorimotrices déterminent l'évaluation consciente des incidents pendant la conduite.

2.1.2 Méthode

Les sujets ont conduit sur le simulateur installé dans les laboratoires de l'IRCCyN et développé par la société OKTAL⁶. Ce simulateur à base fixe est composé d'un poste de pilotage instrumenté avec tout l'équipement d'une place conducteur classique (volant, siège, pédales, boîte de vitesse, planche de bord et tableau de bord à cadran) relié à un ordinateur (Figure 2.1).



Figure 2.1: Simulateur de conduite du laboratoire IRCCyN. L'environnement visuel est affiché sur trois écrans LCD de 32 pouces d'une résolution de 1280 x 720 pixels. Les écrans latéraux sont inclinés de 45° par rapport à l'écran central. L'ensemble offre un champ de vision horizontal de 115° à une distance de 1 mètre.

Les participants devaient conduire sur un court circuit d'environ 700 mètres composé d'une ligne droite d'élan suivie d'une courbe vers la gauche (Figure 2.4). L'environnement simule une route de campagne à 2 voies, séparées par une ligne discontinue (Figure 2.6). Un régulateur de vitesse basique utilisant un correcteur PID avec une vitesse de consigne de 75 km/h ainsi qu'une boîte de vitesse en mode automatique ont été utilisés afin d'éviter un biais lié à la vitesse entre les sujets et pour focaliser les conducteurs sur le contrôle de leur trajectoire.

L'intensité (coefficient d'adhérence)⁷ de ces pertes d'adhérence et leur durée ont été manipulées comme variables indépendantes. Les pertes d'adhérence étaient

⁶ <http://www.oktal.fr/>

⁷ Le coefficient standard d'adhérence étant fixé à 1 (route parfaitement adhérente) sur l'ensemble du parcours, l'intensité représente la différence entre le coefficient standard et le coefficient appliqué lors de la situation de perte d'adhérence. Ainsi, une diminution du coefficient d'adhérence se traduit par une augmentation de l'intensité.

appliquées sur les quatre roues (flaques d'eau, plaques de verglas ou bien route enneigée) pour entraîner un dérapage vers l'extérieur du virage. Un plan d'expérience basé sur un bloc de neuf couples d'intensité et de durée, plus une situation de contrôle, sans incident, a été mis en place. Les valeurs d'intensité et de durée ont été établies lors d'essais préliminaires afin d'engendrer des situations perceptibles mais contrôlables.

Les participants conduisaient quatorze fois sur le circuit, les quatre premiers essais servaient d'étalonnage subjectif et représentaient les valeurs extrêmes des couples intensité et durée. En outre, une conduite de familiarisation au simulateur était effectuée au préalable par chaque participant. Après chaque essai un questionnaire était présenté aux participants afin de recueillir leur jugement subjectif (Figure 2.7 et Table 2.1). Les comportements du véhicule (accélération latérale, vitesse de lacet, etc...) et du conducteur (angle volant) étaient enregistrés pour chaque essai.

Une analyse de la variance à mesure répétée a été conduite avec pour variables indépendantes l'intensité et la durée, et pour variables dépendantes les réponses subjectives (questionnaire) et objectives (enregistrements). Une analyse en composante principale a également été faite sur les variables subjectives afin de déterminer si elles pouvaient être résumées par un ou plusieurs facteurs.

2.1.3 Résultats principaux

Variables subjectives

L'analyse en composante principale nous révèle que toutes les variables subjectives peuvent être représentées par un seul facteur selon un axe opposé au coefficient d'adhérence et sont donc très corrélées.

Nous observons un effet significatif de l'intensité manipulée sur l'intensité perçue, mais pas d'effet de la durée manipulée. La diminution du coefficient d'adhérence entraîne une augmentation de la perception de l'intensité de la perturbation.

Nous observons un effet significatif de l'intensité et la durée manipulée ainsi qu'une interaction significative sur la perception de la durée. Les tests post-hoc nous montrent que l'effet de l'intensité est plus fort pour les perturbations les plus longues.

Les perturbations ont toutes été rapportées comme perçue principalement à travers le volant (valeur moyenne : 8,13), sans effet des variables indépendantes sur les réponses. A l'inverse, seules les perturbations les plus fortes ont été rapportées comme perçues visuellement, avec un effet significatif de l'intensité et de la durée manipulée.

Variables objectives

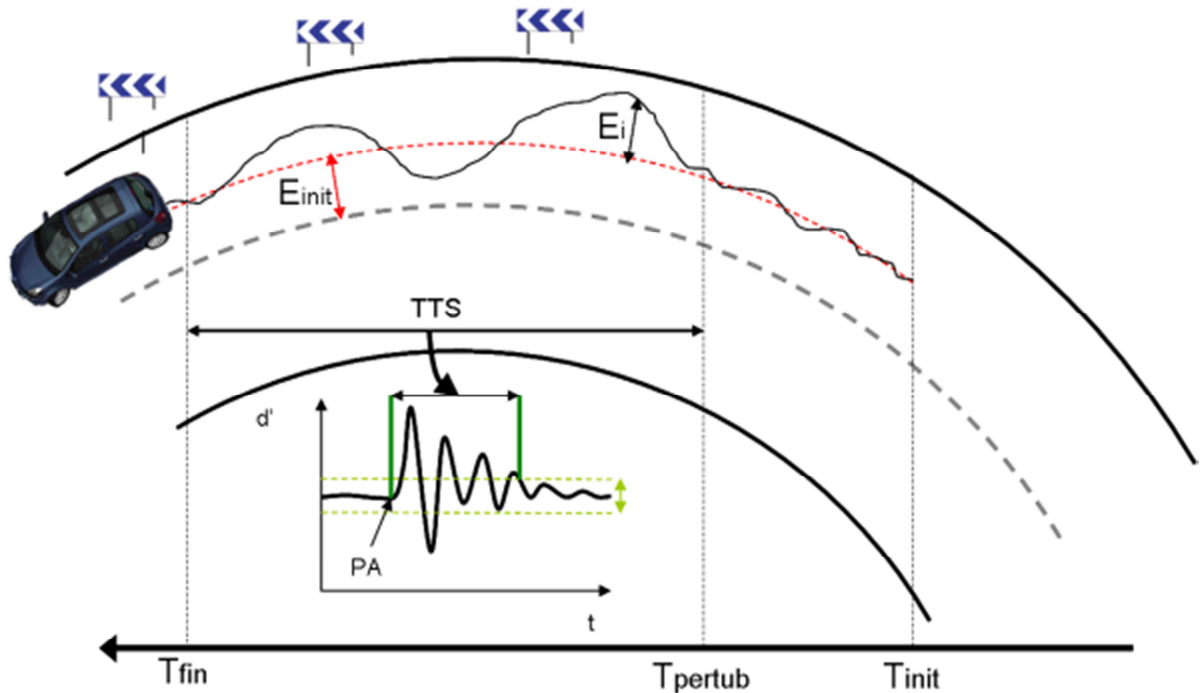


Figure 2.2 : Les variables objectives sont mesurées à l'intérieur d'un intervalle (TTS) débutant au déclenchement de la perte d'adhérence (T_{pertub}) et s'arrêtant après le retour à la stabilité du véhicule (T_{fin}). La variation de la dérive du véhicule a été choisie comme indicateur de stabilité. L'écart latéral maximum (E_i) est mesuré par rapport à l'écart latéral moyen (E_{init}) en virage établi (T_{init}) avant la perturbation.

Nous observons un effet significatif de l'intensité et de la durée ainsi qu'une interaction entre durée et intensité sur le temps de retour à la stabilité (TTS). Les tests post-hoc confirment que l'intensité a un effet plus important pour les perturbations les plus longues et que la durée n'a pas d'influence sur les perturbations les plus faibles en intensité. Les mêmes effets principaux sont observés sur l'angle volant maximum et l'écart latéral maximum.

2.1.4 Discussion

D'un point de vue général, nous avons pu observer que toutes les réponses subjectives étaient corrélées selon une dimension définie par le coefficient d'adhérence, ce qui suggère que les cotations subjectives ont été déterminées par l'intensité de la perturbation et sont cohérentes.

Globalement, l'intensité des pertes d'adhérence a été correctement perçue et ne semble liée ni à l'angle volant maximum, ni à l'écart maximum sur la voie. Par conséquent, nous pouvons suggérer que les sujets ont été capables d'évaluer l'intensité de la perturbation modifiant la trajectoire du véhicule en la dissociant de la correction

nécessaire au maintien de cette trajectoire. La capacité de sujets non-expert à discriminer et classer les perturbations sur le simulateur de conduite montre également l'intérêt de cet outil pour l'étude de ce type d'évènements et le développement de méthodologies d'évaluation adaptées.

La perception de la durée des pertes d'adhérence semble être plus imprécise que la perception de leur intensité. Nous observons une forte interaction entre l'intensité et la durée manipulée sur la durée perçue. On pourrait supposer qu'il y a eu une confusion entre la durée de la perturbation et la durée nécessaire au véhicule pour se stabiliser. Mais cette conclusion semble peu probable au vu des instructions claires données au sujet avant l'expérience et des résultats obtenus sur l'intensité perçue. Une explication plus probable pourrait provenir du niveau de stress engendré par les perturbations les plus fortes comme les réponses aux questions « danger » et « peur » le suggère. Des distorsions de temps ont déjà été observées dans plusieurs conditions de stress (Hancock, 2005 ; Jurkovich, 1987).

Il est généralement admis qu'en situation de conduite « normale » l'information visuelle est la source sensorielle principale pour maintenir sa trajectoire en virage (Donges, 1978 ; Wilkie & Wann, 2005). Les réponses subjectives rapportées sur la provenance sensorielle ayant permis de détecter la perte d'adhérence semblent indiquer que, dans cette expérience, le volant soit la source principale d'information. Cependant, l'absence de restitution inertielle sur ce simulateur limite la portée de l'étude sur ce point.

2.1.5 Conclusions

Cette première expérience nous a permis de démontrer la capacité de sujets non-expert à discriminer différentes situations de perte d'adhérence, notamment au travers de l'intensité de ces dernières. Nous avons ainsi pu caractériser ces situations d'un point de vue subjectif et d'un point de vue objectif et évoquer le lien entre les deux.

Au-delà de ces résultats, intéressants sur le plan scientifique, cette étude nous a également apporté des informations utiles sur le plan technique et méthodologique. Les réponses aux besoins spécifiques du protocole expérimental ont permis une montée en compétence sur l'utilisation et le paramétrage du simulateur aux niveaux logiciel et matériel. Des outils ont été développés pour optimiser le recueil et traitement des données issues de la simulation et des réponses subjectives. Les résultats finaux nous ont également permis de modifier le questionnaire en fonction de la pertinence des résultats associés à chaque item, par exemple le peu d'apport des questions sur la sensation de peur ou de surprise.

2.2 Manuscrit expérimentation 1

Drivers' perception of simulated loss of adherence in bends

Thomas Denoual^{1,2}, Franck Mars², Jean-François Petiot², Gilles Reymond¹, Andras Kemeny^{1,3}

1, RENAULT, Technical Center for Simulation, 1 avenue du golf – 78288 Guyancourt, France

2, LUNAM Université, CNRS, Ecole Centrale de Nantes, IRCCyN (Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes), 1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France

3, Arts et Métiers ParisTech, Institut Image, 2, rue Thomas Dumorey 71100 Chalon-sur-Saône, France

Résumé

Les pertes d'adhérence (PA) en virage, dues à une vitesse excessive ou une altération de la tenue de route, peuvent entraîner des pertes de contrôle qui sont la cause de nombreux accidents. Cet article présente les premiers résultats d'une expérience qui étudie comment les conducteurs perçoivent et réagissent face à un dérapage du véhicule. Les situations de PA choisies induisent une modification perceptible de la trajectoire du véhicule sans provoquer une brutale perte de contrôle ou une sortie de route. L'intensité et la durée de la PA ont été manipulées. Des participants naïfs ont répété plusieurs conduites sur parcours simple composé d'une route droite suivie d'un virage. Pour décrire les PA, deux types d'indicateurs ont été utilisés : des indicateurs objectifs du contrôle de la trajectoire et des indicateurs subjectifs basés sur des descripteurs verbaux cotés après chaque passage. Les premiers résultats ont montré que les conducteurs sont capables de distinguer les différentes conditions de PA. L'intensité de la perturbation a bien été perçue, avec une influence minime de la durée, sans relation apparente avec l'amplitude de la correction au volant. En revanche, une distorsion du temps perçu a été observée. Des analyses plus poussées seront menées pour déterminer dans quelle mesure les indicateurs objectifs et subjectifs sont liés. Cette étude est une première étape dans le but de développer une méthode d'évaluation qui pourrait être appliquée à l'évaluation des interventions d'un ESP dans un simulateur haute performance.

Abstract

Loss of adherence (LOA) in bends, due to excessive speed or alteration of road grip, can lead to loss of vehicle control, which is a cause for many accidents. This paper presents preliminary results of an experiment studying how drivers perceive and react to vehicle skidding in a fixed-base simulator. Situations of LOA inducing a significant modification on the vehicle trajectory without involving a brutal loss of control or a road departure were chosen. The intensity and the duration of the LOA were manipulated. Naive participants repeated short drives on a track made of a straight road followed by a bend and were asked to answer a questionnaire after each track. To describe the LOA, two types of indicators were used: objective indicators of steering control and subjective indicators based on verbal descriptors scaled after each track. Preliminary results showed that drivers were able to discriminate the different conditions of LOA. The intensity of the perturbation was well perceived, with minimal influence of duration and not apparent relation to the magnitude of the steering correction. By contrast, a distortion of subjective time was observed when the duration of the LOA was assessed. Further analyses will be conducted to determine to what extent objective and subjective indicators were related. This study is the first step to develop an evaluation method that could be applied to the evaluation of ESC system intervention in high performance simulators.

2.2.1 Introduction

Loss of adherence (LOA) can lead to loss of vehicle control, which causes many accidents. Electronic stability control (ESC) can limit the consequences by correcting the vehicle trajectory according to the driver's intentions and dynamics of lateral acceleration, yaw speed or drift of the vehicle (Erke, 2008; Liebmenn et al., 2004). The calibration and validation processes are time consuming and require physical prototypes and experts drivers on specific grounds, especially for very low adherence situations. Consequently, driving simulators are being used to study LOA episodes and ESC performance (Papelis et al., 2010). Driving simulators are useful tools in vehicle design and perception studies. They allow to safely explore critical situations with naive drivers without environmental bias (Kemeny, 2009). The present study is the first step of a research program aiming at understanding how drivers perceive and react to trajectory perturbations and, further on, to the intervention of an ESC system. This could be useful for the engineering specifications of ESC using driving simulators and to evaluate how actual drivers perceive different system configurations.

During LOA episodes inducing sudden changes in the vehicle trajectory, the driver must perform an appropriate steering response to maintain the vehicle into the lane and avoid road departure. Numerous sensorimotor models have been proposed to explain how drivers use visual, vestibular and haptic information to steer a vehicle in normal conditions (Donges, 1978; Raymond et al., 2001; Toffin et al., 2007). However, little is known about sensory cues that are used by the driver to detect LOA episodes and how steering responses are carried out. Besides, hierarchical model of cognitive control applied to driving postulate that steering mainly relies on sensorimotor loops which operate below the level of consciousness (Hollnagel, 2004; Michon, 1985). Typically, emergence to consciousness arises when external disturbances occur (Hoc & Amalberti, 2007). Assessing at the same time steering responses to LOA and the associated subjective experience may be a way to investigate how sensorimotor cues determine the conscious evaluation of driving incidents.

This paper presents a driving simulator experiment in which episodes of LOA were triggered to produce significant modification of the vehicle trajectory without loss of control and road departure. Intensity and duration of the LOA were manipulated. The first objective was to develop an evaluation method to describe LOA episodes by means of subjective indicators using a non-structured-scaled questionnaire (Strigler et al., 1998). Objective indicators of the vehicle's dynamic and driver behaviour were also analysed.

Another objective was to determine to what extent objective and subjective indicators were related (Mellert et al., 2008).

2.2.2 Method

Participants

Four female and sixteen male drivers between 20 and 24 years old (mean age of 21.4) participated in the experiment. They had driving licence for 3.4 years on average and drove between 1000 and 25000 km per year (mean = 6325). All of them had normal or corrected-to-normal vision. Fourteen participants declared that they had already faced to a loss of adherence situation on the road, two of them during a specific driving lesson. Two participants had already used a simulator.

Apparatus

The experiment was conducted on a fixed-base simulator at IRCCyN laboratory (Nantes, France). It consists of a compact size passenger car with actual instrument panel, clutch, brake and accelerator pedals, handbrake, ignition key and an adjustable seat with seat-belt. Transmission is done by an automatic gear box. Vibrators are installed at the bottom of driver seat and upper position of the steering column to render engine noise and vibrations. Active steering force feedback is rendered by a TRW steering wheel. The audio system renders the audio environment for an interactive vehicle. It contains an amplifier, 4 speakers and sub-woofer.

The SCANeR[®]II⁸ software package was used with CALLAS[®] dynamic vehicle model (Lechner et al., 1997).

The visual environment was displayed on three 32 inch LCD monitors with a resolution of 1280x720 each, one in front of the driver and two laterals inclined of 45° from the front one, viewed from a distance of about 1 meter and covering 115° of visual angle (Figure 2.4). The graphics database reproduced an open countryside environment. The experiment was performed on a short part of the environment which consisted in a straight line followed by a bend (total distance: 700 m, mean radius in the bend: 111 m) without traffic (Figure 2.4).

⁸ <http://www.scanersimulation.com/>



Figure 2.3: IRCCyN driving simulator

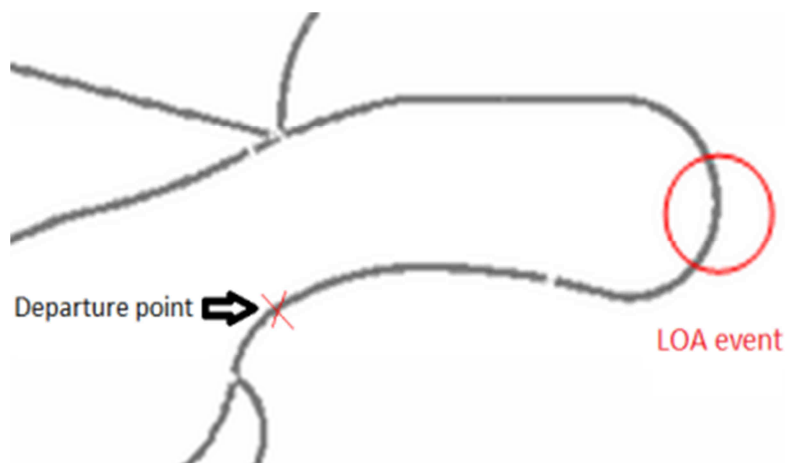


Figure 2.4: Layout of the country track.

A simple generic speed regulator was used, consisting of a PID corrector with a nominal speed of 75 km/h, using the automatic gearbox mode in order to reject inter subject velocity bias. This condition also allowed the subject to be only focused on the steering task.

Two type of LOA were simulated in the bend by modifying the adherence under the wheels when the vehicle reached a defined point. The intensity (adherence coefficient) and duration of the simulated LOA in the bend were manipulated as independent variables (IV). An adherence coefficient decrease corresponds to an increase of the intensity of LOA. These values of intensity and duration values were chosen to induce perceptible but controllable LOA. LOA was simulated either on the four

wheels (LOA1) or on the rear wheels (LOA2). The LOA1 situation induced a skidding to the outside of the bend comparable to an actual situation of driving on a patch of black ice, a puddle or a pool of oil depending on the independent variables values. The LOA2 induced situations similar to over-steering. The results of the LOA2 are not presented in this paper. After the LOA, coefficient of adherence was set again to 1. The environment was not giving clues about a potential LOA (snow, rain or mark on the road) (Figure 2.6).

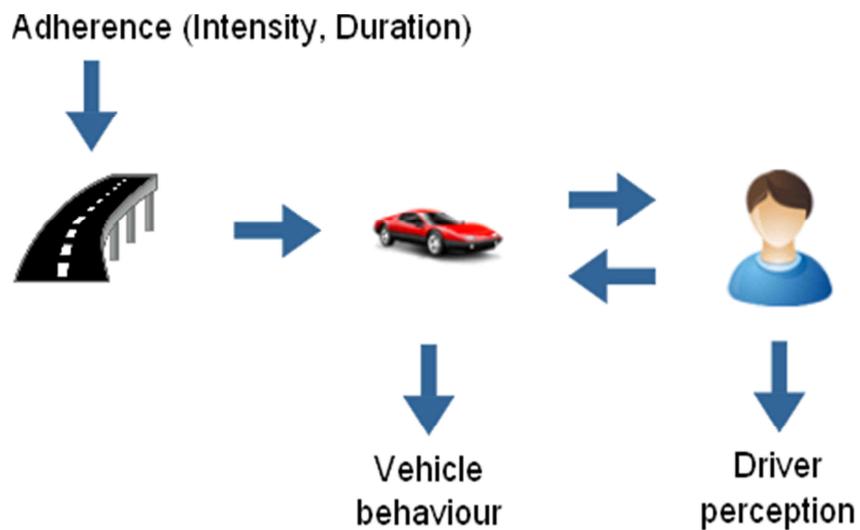


Figure 2.5: Input and output data



Figure 2.6: Visual environment in the bend

Procedure

The subjects settled themselves in the simulator while preliminary instructions were given. In particular, they were asked to keep their lane without cutting the bend

even if there was no oncoming traffic. Then, they were invited to start the simulator and drive a 10 minutes session for training. Next, they drove around the test bend with automatic gearbox and speed regulator on with the repeated instruction to stay in their lane and focus on the trajectory. Four trials without any LOA were performed in order to familiarize the subjects with the bend.

For each type of LOA, a control condition (no LOA) was inserted in the experimental design. The order of presentation of LOA1 and LOA2 was counterbalanced across the subjects. The same Williams Latin Squares design (Williams, 1949) was adopted for each type of LOA to avoid rank and carry-over effects. 20 trials divided into two sequences of each type of LOA preceded by 4 preliminaries trials representing mild and strong LOA episodes were performed. Those 8 preliminaries trials were conducted in order to familiarize the participants to the range of steering perturbations they would encounter during the experiment. They were not analyzed. The two types of LOA induced very different modifications in the vehicle behaviour and situation's perception. Therefore we have chosen this block design to avoid heterogeneous scaling on subjective indicators. Moreover, the experimental design was different for each type of LOA to keep perceptible but controllable situations. A 3*3 factorial design was used for LOA1 (Intensity: 0.1, 0.3 & 0.5; Duration: 250ms, 500ms & 750ms) (table 2). A constrained design was used for LOA2 (Intensity: 0.1 to 0.6; Duration: 100 to 500ms). After each trial, a questionnaire was displayed with 13 questions about subjects' perception of the event (Table 2.1). Answers to the questions were given by the mean of continuous horizontal scroll bars representing two ends of a continuous scale (0: totally disagree to 10: totally agree) (Figure 2.7) except for 4th question (Yes / No). Only LOA1 results are presented in this paper.

Behavioural measures (lateral position, steering angle, lateral acceleration, etc.) were recorded all along the trials at 20 Hz.

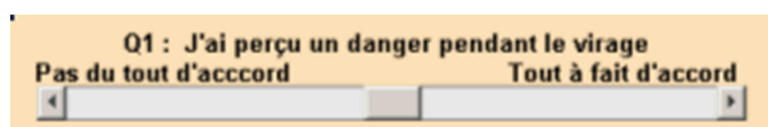


Figure 2.7: Visual answer interface of a question

Item	Question
Danger	"I perceived a danger during the bend"
Fear feeling	"I was afraid during the bend"
Feeling of control	"I easily kept my vehicle in the lane"
Perturbation perception	"Did you feel a perturbation in the bend?"
Intensity	"The LOA appeared to be weak/strong"
Duration	"The LOA appeared to be short/long"
Visual cue	"I visually perceived the LOA"
Haptic cue	"I perceived the LOA through the steering wheel"
Physical move	"I had the impression of physically moving"
Skid direction	"I felt the vehicle was skidding from the front/rear"
surprise	"I was surprised by the vehicle response"
realism	"Driving the simulator was unrealistic/realistic"
comfort	"I was at ease during the trial"

Table 2.1 : Summary of the items corresponding to each question

Data analysis

For each condition, the mean and the standard deviation of the subjective answers were computed. When the fourth question was ticked "no", the following answers were settled to a "default value" depending on the meaning of the question.

For each run, a time to stability (TTS) corresponding to the time taken by the driver after the onset of LOA to bring the vehicle drift speed back into a stability envelope was computed. This envelope is defined as the standard deviation of the mean drift speed and was measured in the control condition. Drift speed was calculated using the

following formula: $\varphi_{drift} = \frac{d \arctan(\frac{v_y}{v_x})}{dt}$ with φ_{drift} the angular drift speed, v_x the

longitudinal speed and v_y the lateral speed. The following objective data were observed in TTS interval: lateral deviation, steering wheel angle, slip angle, yaw speed and lateral acceleration.

Repeated measures analyses of variance (ANOVA, $\alpha = .05$) with the intensity and the duration of the LOA as independent variables (IV) were performed on the data. Scheffé tests were performed for post-hoc analyses. A principal component analysis was also performed on the subjective indicators in order to determine if they could be summarized by one or several underlying factors.

2.2.3 Results

Subjective data

The principal component analysis of the subjective data showed that all indicators can be represented by a single factor, which means that all variables were highly correlated. The simulation was globally judged as realistic (mean score = 7.64) with no significant effect of intensity and duration.

There was a significant effect of intensity and duration of LOA and a significant interaction between both IV on the duration and danger perception, fear and feeling of control. The effect of intensity and the interaction between both IV on perceived intensity was significant, but the effect of duration was not (Table 2.3). Post-hoc tests confirmed that the effect of intensity on duration, danger and intensity perception, fear and feeling of control was significantly higher for longer LOA.

There was no significant effect of the IV on the perceived direction of skidding. Participants could not tell if the vehicle was skidding from the front or the rear side (mean value: 5.11, SD: 2.7).

All the LOA situations were clearly perceived through the steering wheel (mean value: 8.13, SD: 2.35) and there was no significant effect of the IV. Conversely, only the strongest LOA were perceived visually, as shown by the significant effect of the intensity ($F(2,38) = 62.53, p < .05$) and duration ($F(2,38) = 4.79, p < .05$)

Objective data

Conditions	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Adherence coefficient	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5
Duration (ms)	250	500	750	250	500	750	250	500	750
TTS max (s)	5.15	5.2	6.15	5.35	5.15	6.15	6.15	2.65	3.55
TTS mean (s)	3.02	4.13	5.55	2.18	3.2	3.93	1.14	1.07	1.44

Table 2.2: Maximum and mean TTS for each condition

Intensity ($F(2,38) = 200.97, p < .05$), duration ($F(2,38) = 57.65, p < .05$) and interaction between both IV ($F(4,76) = 13.14, p < .05$) had significant effects on the TTS. Post-hoc test confirmed that the effect of intensity on TTS was significantly higher for long duration and that there was no significant effect of the duration for lower level of intensity.

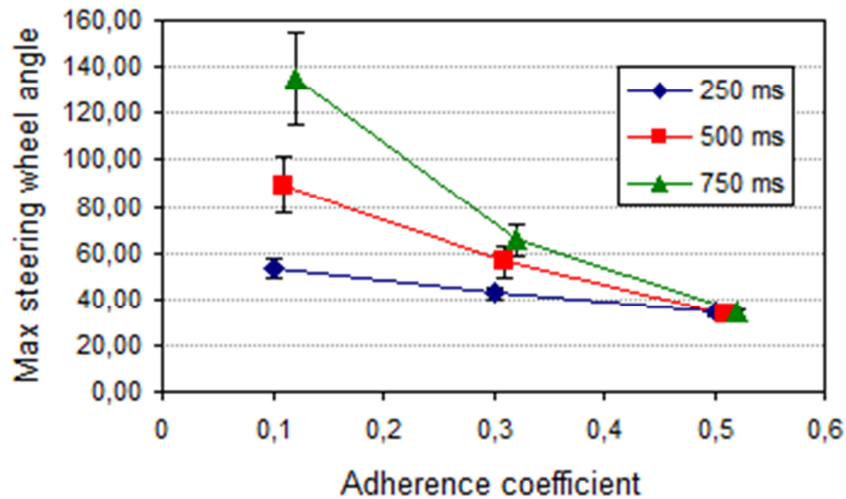


Figure 2.8: ANOVA of the maximum steering wheel angle.

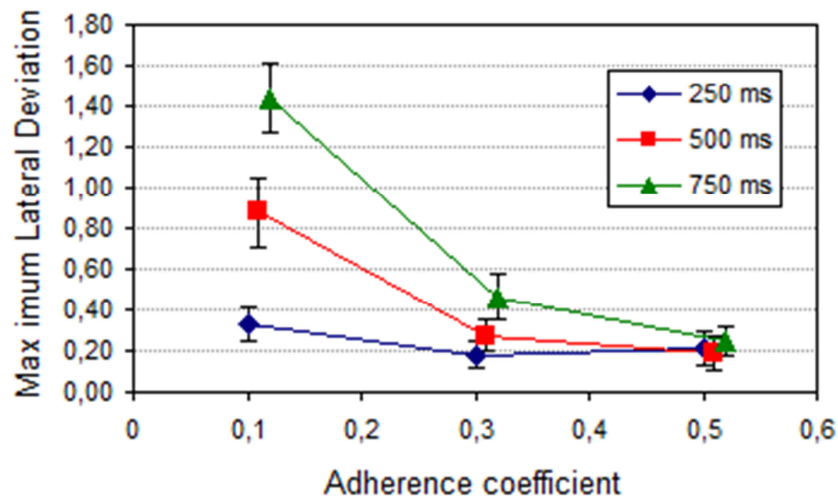


Figure 2.9: ANOVA of the maximum lateral deviation from the centre of the road.

The ANOVA performed on the maximum steering wheel angle (Figure 2.8) showed a significant effect of intensity ($F(2,38)=136.7$, $p<.05$) and duration ($F(2,38)=47.21$, $p<.05$), with a significant interaction between both IV ($F(4,76)=23.08$, $p<.05$). Similar results were observed on the maximum lateral deviation (Figure 2.9); intensity: $F(2,38)=125.48$, $p<.05$, duration: $F(2,38)=97.08$, $p<.05$; interaction: $F(4,76)=30.08$, $p<.05$).

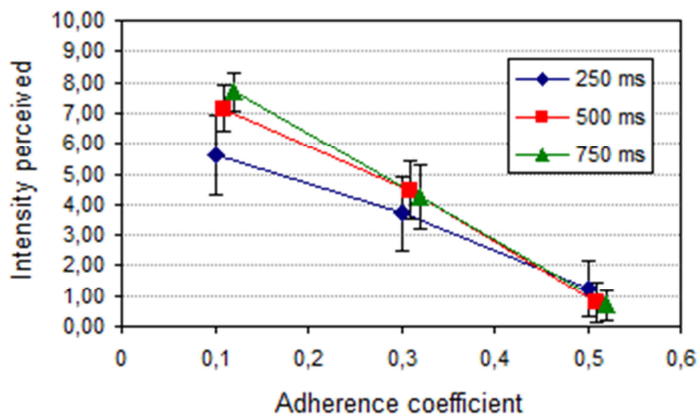


Figure 2.10: Intensity perception

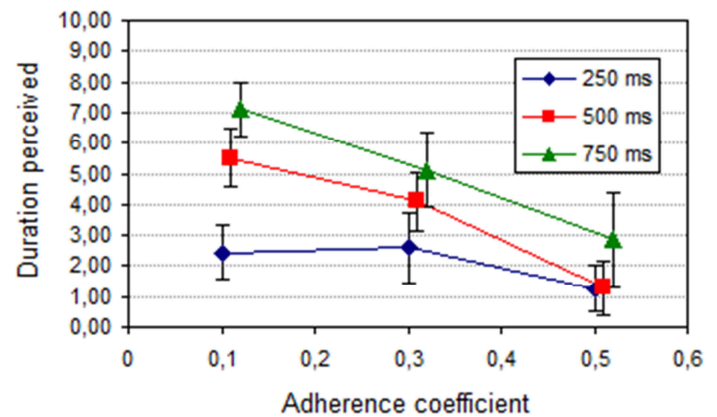


Figure 2.11: Duration perception

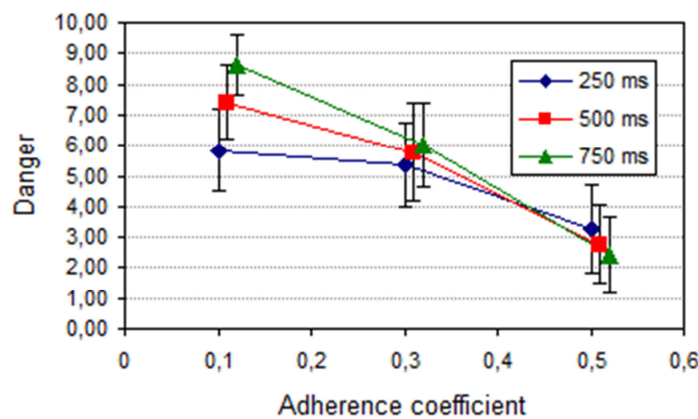


Figure 2.12: Danger

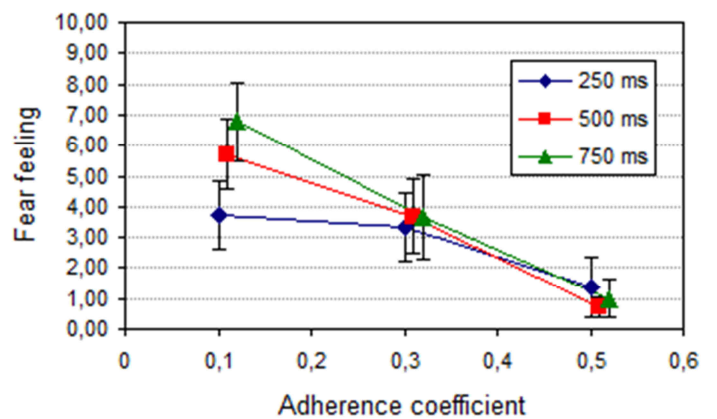


Figure 2.13: Fear feeling

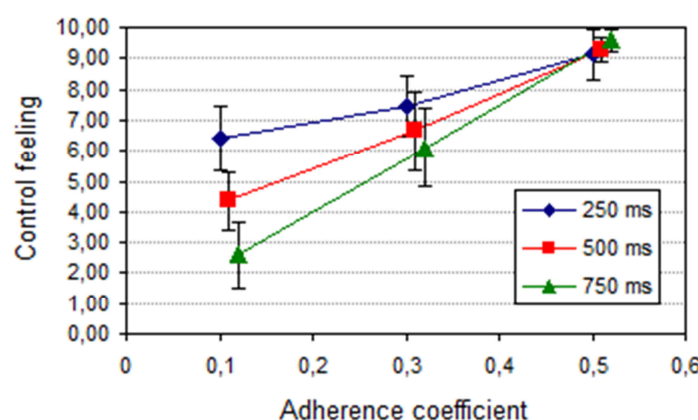


Figure 2.14: Control feeling

Subjective Items	IV	F	LoS
Intensity	Intensity	(2,38) = 108.47	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 1.97	n.s.
	Intensity*Duration	(4,76) = 5.35	$p < 0.05$
Duration	Intensity	(2,38) = 34.78	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 21	$p < 0.05$
	Intensity*Duration	(4,76) = 4.47	$p < 0.05$
Control feeling	Intensity	(2,38) = 89.58	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 11.36	$p < 0.05$
	Intensity*Duration	(4,76) = 8.2	$p < 0.05$
Danger	Intensity	(2,38) = 63.04	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 3.86	$p < 0.05$
	Intensity*Duration	(4,76) = 7.08	$p < 0.05$
Fear feeling	Intensity	(2,38) = 50.1	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 6.67	$p < 0.05$
	Intensity*Duration	(4,76) = 7.3	$p < 0.05$

Table 2.3: Summary of the statistical analyses performed on the effect of intensity and duration on the selected subjective variables.

2.2.4 Discussion

From a general point of view, all subjective answers were correlated and can be described along one dimension, opposed to the adherence coefficient, as revealed by the principal component analysis. This suggests that all subjective ratings were coherent and determined by the intensity of the trajectory perturbation. The question remains now to determine if the participant were able to discriminate the magnitude and duration of the manipulated LOA.

The intensity of the LOA was perceived correctly with only minimal influence of the duration for the higher intensity of LOA. Interestingly, the perceived intensity was neither related to the maximum steering angle nor to the maximum lateral deviation. Since the maximum steering angle can be considered as a good indicator of the intensity of the steering correction, this suggests that subjects were able to evaluate how much adherence the vehicle lost, independently of how long it lasted and how much steering correction was needed.

By contrast, the duration of the LOA was poorly perceived. There was a strong interaction with the intensity of the LOA, revealing that the stronger it was, the longer it was perceived. It could be argued that the participant confused the duration of the LOA with the time needed to stabilize their vehicle, but the clear instructions given prior to the experiment make this assumption hardly believable.

A more plausible explanation is that LOA of high intensity were more stressful than milder one, as showed by the fear and danger ratings. Distortions of time have been observed under stress conditions, especially under life threatening conditions (Hancock & Weaver, 2005) or during specific critical tasks by paramedics (Jurkovich et al., 1987). The underlying processes may be the attention. Indeed, Tse et al. (2004) proposed that novel or important events run in "slow motion" so that the information may be processed in greater depth per unit of objective time than are casual events.

Further experimentation with more experimented drivers on a high performances simulator with dynamic motion rendering should lead to more consistent results. Indeed, (Kemeny & Panerai, 2003) highlighted the importance of vestibular cues rendering in speed perception and steering in a simulator.

2.2.5 Conclusion

This study demonstrated that drivers are able to discriminate different conditions of LOA on a fixed-based simulator. Whereas the intensity of LOA episodes could be assessed by the driver with only minor distortions, a subjective expansion of their duration was observed. Further analyses will attempt to more clearly link subjective ratings and steering responses, and also to match the observed data with ESC triggering criteria.

2.2.6 References

- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behavior. *Human Factors*, 20(6), 691–707.
- Erke, A. (2008). Effects of electronic stability control (ESC) on accidents: A review of empirical evidence. *Accident Analysis & Prevention*, 40(1), 167–173. doi:10.1016/j.aap.2007.05.002
- Hancock, P. A., & Weaver, J. L. (2005). On time distortion under stress. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 6(2), 193–211. doi:10.1080/14639220512331325747
- Hoc, J. M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(1), 22–55. doi:10.1177/155534340700100102
- Hollnagel, E. (2004). A function-centred approach to joint driver-vehicle system design (Vol. 3, pp. 2548–2551). IEEE. doi:10.1109/ICSMC.2004.1400713
- Jurkovich, G. J., Campbell, D., Padrta, J., & Luterman, A. (1987). Paramedic perception of elapsed field time. *The Journal of Trauma*, 27(8), 892–897.
- Kemeny, A. (2009). Driving simulation for virtual testing and perception studies (pp. 15–23). Presented at the Driving Simulation Conference Europe.
- Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), 31–37. doi:10.1016/S1364-6613(02)00011-6
- Lechner, D., Delanne, Y., Schaeffer, G., & Schmitt, V. (1997). *Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS: Dynamique du véhicule automobile et ferroviaire*. Ingénieurs de l'automobile. Garches, FRANCE: VB.
- Liebemann, E. K., Meder, K., Schuh, J., & Nenninger, G. (2004). Safety and Performance Enhancement: The Bosch Electronic Stability Control (ESP). SAE, (2004-21-0060).
- Mellert, V., Baumann, I., Freese, N., & Weber, R. (2008). Impact of sound and vibration on health, travel comfort and performance of flight attendants and pilots. *Aerospace Science and Technology*, 12(1), 18–25. doi:10.1016/j.ast.2007.10.009

- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? *Plenu Press*, pp. 485–520. New-York.
- Papelis, Y. ., Watson, G. ., & Brown, T. . (2010). An empirical study of the effectiveness of electronic stability control system in reducing loss of vehicle control. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 929–934. doi:10.1016/j.aap.2009.04.018
- Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., & Berthoz, A. (2001). Role of Lateral Acceleration in Curve Driving: Driver Model and Experiments on a Real Vehicle and a Driving Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 43(3), 483–495. doi:10.1518/001872001775898188
- Strigler, F., Touraille, C., Sauvageon, F., Barthelemy, J., & Issanchou, S. (1998). Les épreuves. *évaluation sensorielle : manuel méthodologique* (Lavoisier.). Depledt F. & Strigler F.
- Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., & Droulez, J. (2007). Role of steering wheel feedback on driver performance: driving simulator and modeling analysis. *Vehicle System Dynamics*, 45(4), 375–388. doi:10.1080/00423110601058874
- Tse, P. ., Intriligator, J., Rivest, J., & Cavanagh, P. (2004). Attention and the subjective expansion of time. *Perception & Psychophysics*, 66(7), 1171–1189.
- Williams, E. (1949). Experimental Designs Balanced for the Estimation of Residual Effects of Treatments. *Australian Journal of Chemistry*, 2(2), 149. doi:10.1071/CH9490149

CHAPITRE 3

Evaluation des perceptions et restitution de mouvement

3.1 Influence du rendu inertiel sur l'évaluation de pertes d'adhérence

3.1.1 Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que des sujets non experts étaient capables de discriminer et correctement classer des situations de perte d'adhérence sur un simulateur de conduite statique. Nous avons pu identifier que, dans ce cas, les cotations subjectives sont principalement influencées par l'intensité de la perte d'adhérence (coefficient d'adhérence). Cette première expérience nous a permis de proposer et de tester une approche méthodologique pour évaluer la perception de pertes d'adhérence sur simulateur avec des contraintes expérimentales et techniques faibles. De plus, il semblerait que le volant ait été la source principale d'information permettant de détecter les événements de perte d'adhérence.

Cependant, l'absence de restitution inertielle du mouvement limite la portée des résultats, principalement pour le dernier point. En effet, l'importance des informations inertielles pour contrôler sa trajectoire et percevoir le mouvement a été discutée d'un point de vue général par Kemeny et Panerai (2003) et mise en évidence dans des tâches similaires par Wierwille et al (1983), Reymond et al (2001) ou Correia Gracio et al (2009). C'est pourquoi nous avons mené une seconde expérience similaire sur le simulateur dynamique haute performances ULTIMATE afin de valider notre approche méthodologique et étudier l'influence de la restitution du mouvement sur l'évaluation des pertes d'adhérence par les conducteurs.

3.1.2 Méthodes

Vingt sujets (différents de l'expérience précédente) ont conduit sur un simulateur (ULTIMATE) et un circuit identique à la première expérimentation (CHAPITRE 2). Le simulateur dynamique ULTIMATE du centre technique de simulation RENAULT® permet la restitution des informations inertielles au travers d'une plateforme de type Gough-Stewart monté sur deux rails X-Y permettant de restituer les rotations et les accélérations. Les conducteurs sont installés dans un véritable cockpit instrumenté de type Laguna avec une restitution de couple volant assuré par un modèle propriétaire et une colonne TRW®. L'environnement visuel est affiché sur un écran cylindrique (radius 1.9 m) par 3 vidéoprojecteurs et couvre un champ visuel de 150°. Plus de détails techniques sont disponibles dans le papier de Dagdelen et al. (2006). Le logiciel SCANeR® Studio associé à une version temps-réel de MADA (modèle avancé pour la

dynamique automobile), logiciel de dynamique véhicule développé par RENAULT®, a été utilisé.

Un plan d'expérience identique à la première expérimentation a été utilisé (CHAPITRE 2) ainsi que les mêmes types d'analyses de données (Analyse en composante principale et analyse de la variance). Le questionnaire a été légèrement modifié pour prendre en compte l'ajout du rendu des informations inertielles et le peu d'information apporté par certaines questions.

3.1.3 Résultats principaux

Variables subjectives

Nous observons un effet significatif de l'intensité manipulée et une interaction entre intensité et durée manipulées sur l'intensité perçue. Un effet significatif de l'intensité et de la durée manipulée est observé sur la durée perçue. Les tests post-hoc montrent que l'effet de l'intensité est uniquement significatif pour la durée intermédiaire.

L'ajout de la restitution de mouvement semble influencer notablement la perception des conducteurs. En effet, les perturbations ont toutes été rapportées comme perçues principalement par ce biais (valeur moyenne : 7.89). La perception au travers des retours de force au volant arrive en retrait (valeur moyenne : 4.1). Seules les perturbations moyennes et fortes ont été rapportées comme perçues visuellement, avec un effet significatif de l'intensité et de la durée manipulée.

Variables objectives

Nous observons un effet significatif de l'intensité et de la durée manipulée sur le temps de retour à la stabilité (TTS). Par ailleurs, l'intensité et la durée manipulée ainsi que leur interaction ont un effet significatif sur l'angle volant maximum et l'écart latéral maximum.

3.1.4 Discussion

L'évaluation subjective des pertes d'adhérence sur simulateur est principalement déterminée par l'intensité manipulée et fortement influencée par la présence de restitution inertielle. Cette expérience confirme la capacité de sujets non-experts à discriminer et correctement classer ce type d'événements.

L'expérience précédente (CHAPITRE 2) avait mis en évidence la difficulté des sujets à correctement percevoir la durée probablement due à une distorsion du temps

perçu sous l'effet du stress. Nous avons ainsi supposé que l'immersion plus importante apportée par le simulateur dynamique haute performances ULTIMATE aurait conduit à une augmentation du niveau de danger perçu, et donc une accentuation de cette mauvaise perception du temps. Ceci n'a pas été observé. Au contraire, les mouvements de la plateforme générés par la perte et la reprise soudaine d'adhérence semblent avoir donné des indications claires et importantes dans l'évaluation de la situation.

La perception visuelle des événements a été rapportée seulement pour les perturbations les plus fortes et intermédiaires sur le simulateur statique. Sur le simulateur dynamique, l'ajout des informations inertielles a renforcé la perception visuelle des intensités plus faibles. Cela reflète probablement les interactions visuo-vestibulaires qui entrent en jeu dans la perception du mouvement propre (Kemeny et Panerai, 2003). Le mouvement perçu par le système vestibulaire doit ainsi faciliter la détection de la perturbation par le biais de la vision.

Les cotations subjectives concernant les informations non-visuelles (haptiques et inertielles) suggèrent que celles-ci semblent avoir un rôle prépondérant dans la perception de ce type d'évènement critique. Il est intéressant de noter que les résultats diffèrent fortement entre les deux expérimentations, c'est à dire en fonction des informations sensorielles restituées. L'explication la plus probable est que les sujets se concentrent sur l'information qui leur semble la plus saillante et la plus fiable. En effet, le simulateur dynamique semble avoir augmenté la perception de la perturbation au travers des informations inertielles, et principalement vestibulaires. Au contraire, les informations de retour d'effort au volant ont sûrement été les informations les plus utiles pour détecter et évaluer les pertes d'adhérence sur le simulateur statique. Bien que les informations inertielles semblent surpasser les informations visuelles et haptiques sur le simulateur ULTIMATE, nous ne pouvons pas affirmer clairement que ce sont les informations prédominantes pour détecter des pertes d'adhérence. Ces résultats pourraient également montrer certaines limitations du simulateur pour la reproduction du mouvement réel d'un véhicule et le retour des forces au volant. D'autres expérimentations seront nécessaires pour confirmer ce point.

D'un point de vue technique, cela met en évidence l'importance de la fidélité du rendu du mouvement et du couple volant pour l'évaluation de situations mettant en jeu des changements brutaux de trajectoire.

Par ailleurs, cette étude confirme la validité de la méthodologie proposée et l'intérêt de l'utilisation des simulateurs de conduite, avec des sujets non-experts, dans l'évaluation du comportement dynamique d'un véhicule en situation critique. Les

données récoltées peuvent ainsi fournir des informations complémentaires dans la mise au point des prestations véhicules, principalement en phase amont du processus de conception.

3.2 Manuscrit expérimentation 2

Drivers' perception of loss of adherence in bends: influence of motion rendering

Thomas Denoual^{1,2}, Franck Mars², Jean-François Petiot², Gilles Reymond¹, Andras Kemeny^{1,3}

**1, RENAULT, Technical Center for Simulation, 1 avenue du golf – 78288
Guyancourt, France**

**2, LUNAM Université, CNRS, Ecole Centrale de Nantes, IRCCyN (Institut de
Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes), 1 rue de la Noë, BP
92101, 44321 Nantes Cedex 3, France**

**3, Arts et Métiers ParisTech, Institut Image, 2, rue Thomas Dumorey 71100 Chalon-
sur-Saône, France**

Résumé

Cet article étudie la perception des conducteurs dans des situations de perte d'adhérence dans un simulateur de conduite statique et un simulateur dynamique. L'intensité et la durée des pertes d'adhérences ont été manipulées. Les résultats montrent que les conducteurs ont été capables de correctement discriminer les différentes conditions de perte d'adhérence dans les deux simulateurs. Ils soulignent également l'importance des informations non-visuelles, avec une prépondérance des informations haptiques provenant du volant pour le simulateur statique et, une prédominance des informations haptiques du volant et de restitution du mouvement par la plateforme pour le simulateur dynamique. Cette étude est une première étape dans le développement d'une méthode d'évaluation de l'utilisation des systèmes de contrôle de trajectoire électronique (ESC) par des expériences sur simulateur haute performance.

Abstract

This paper investigated drivers' perception during situations of loss of adherence (LOA) in static and dynamic driving simulators. The intensity and duration of the LOA were manipulated. Results show that drivers were able to correctly discriminate the different conditions of LOA in both simulators. They also highlight the importance of non-visual information, with steering wheel haptic cues predominating for the static simulator and both the steering wheel and motion platform predominating for the dynamic simulator. This study is a first step in developing an evaluation method for electronic stability control (ESC) handling in high-performance simulator experiments.

Keywords: Driving simulation, subjective assessment, sensorimotor cues.

3.2.1 Introduction

Loss of adherence (LOA) can lead to loss of vehicle control, a major factor in many accidents. Electronic stability control (ESC) can limit the consequences of LOA by correcting vehicle trajectory according to the driver's intentions and dynamics of lateral acceleration, yaw speed or drift of the vehicle (Erke, 2008; Liebmenn et al., 2004). The calibration and validation processes of ESC are time consuming and require the use of physical prototypes and expert drivers at specific test sites, especially for very low-adherence situations. Consequently, driving simulators are being used to study LOA episodes and ESC performance (Papelis et al., 2010; Watson et al., 2006). Driving simulators are useful tools in vehicle design and perception studies. They allow the safe exploration of critical situations with naive drivers and without environmental bias (Kemeny, 2009). The present study is the first stage of a research program which is aimed at understanding how drivers perceive and react to trajectory perturbations and to the intervention of an ESC system. This could be useful for using driving simulators to develop the engineering specifications of ESC and to evaluate how actual drivers perceive different system configurations.

During LOA episodes, when sudden changes in the vehicle trajectory are induced drivers must perform an appropriate steering response to maintain the vehicle in the lane and avoid road departure. Numerous sensorimotor models have been proposed to explain how drivers use visual, vestibular and haptic information to steer a vehicle in normal conditions (Donges, 1978; Mars, 2008; Reymond et al., 2002; Toffin et al., 2007). However, little is known about sensory cues that are used by drivers to detect LOA episodes and the way in which steering responses are carried out. Hierarchical models of cognitive control applied to driving postulate that steering mainly relies on sensorimotor loops which operate below the level of consciousness (Hollnagel, 2004; Michon, 1985); emergence to consciousness arises when external disturbances occur (Hoc & Amalberti, 2007). We propose to investigate how sensorimotor cues determine the conscious evaluation of driving incidents by assessing steering responses to LOA along with the associated subjective experience.

This paper presents two driving simulator experiments in which episodes of LOA were triggered to produce significant modification of the vehicle's trajectory without loss of control and road departure. Intensity and duration of the LOA were manipulated. The first objective was to develop an evaluation method to describe LOA episodes by means of subjective indicators using a non-structured-scaled questionnaire (Strigler et al., 1998). Objective indicators of the vehicle's dynamics and driver behaviour were also

analyzed. Another objective was to determine to what extent objective and subjective indicators were related (Petiot & Yannou, 2004).

A first experiment was conducted on a fixed-base simulator in order to develop the evaluation method with fewer technical constraints. Preliminary results have been presented in (Denoual et al., 2010). A second experiment was conducted on a high-performance dynamic simulator to improve the evaluation method and highlight the influence of motion rendering on driver's perception (Correia Gracio et al., 2009; Kemeny & Panerai, 2003; Reymond et al., 2001; Wierwille et al., 1983). We also hypothesized that a dynamic high-performance driving simulator would improve the feeling of immersion and give rise to a more consistent and discriminating evaluation of LOA characteristics.

3.2.2 Method

Participants

A total of 20 participants (4 female, 16 male) aged between 20 and 24 (mean age: 21.4) participated in the first experiment. They had held a driving licence for 3.4 years on average and drove between 1000 and 25000 km per year (mean: 6325 km).

A total of 20 participants (5 female, 15 male) aged between 19 and 58 years old (mean age: 36.8) participated in the second experiment. They had held a driving license for 16.7 years on average and drove between 1000 and 40000 km per year (mean: 17538 km).

Apparatus

The first experiment was conducted on a fixed-base simulator at the IRCCyN laboratory (Figure 3.1a). It consists of a compact size passenger car with actual instrument panel, clutch, brake and accelerator pedals, handbrake, ignition key and an adjustable seat with seat belt. It is equipped with a TRW active steering system for realistic "scale one" force-feedback. Transmission was carried out using an automatic gearbox. Vibrators were installed underneath the driver seat and upper position of the steering column to render engine noise and vibrations. The audio system reproduces the audio environment for an interactive vehicle. It comprises an amplifier, four speakers and a subwoofer.

The SCANeR©II software package was used with the CALLAS© dynamic vehicle model (Lechner et al., 1997). The visual environment was displayed on three 32-inch LCD monitors, each with a resolution of 1280 x 720. One monitor was positioned in front

of the driver, with two laterals inclined at 45° from the front one, viewed from a distance of about 1 m and covering 115° of visual angle. A simple generic speed regulator was used, consisting of a PID corrector with a nominal speed of 75 km/h, using the automatic gearbox mode in order to reject inter-subject velocity bias. This also allowed the subject to concentrate on the steering task.

The second experiment was conducted on the high-performance dynamic Ultimate simulator (Dagdelen et al., 2006) at Renault Technical Center for Simulation (Figure 3.1b). It consists of a compact size passenger car based on a real Laguna interior design. The cab is mounted on a large X-Y table and a hexapod motion system to render physical accelerations and rotations. Transmission is carried out using a manual gearbox. A system of sound synthesis is used to reproduce engine noise and the audio environment for an interactive vehicle. Active steering force feedback is computed by a proprietary model and reproduced by a TRW electric power steering system.

The SCANeR© Studio software package was used with a real-time version of the MADA (Advanced Modeling of Vehicle Dynamic) vehicle dynamic software, developed by RENAULT. The visual environment was displayed on a cylindrical screen (radius 1.9 m) by three single-chip DLP projectors, each with a resolution of 1024 x 768. The system covers a visual angle of 150° . Speed regulation was unavailable for this experiment.



Figure 3.1: (a) IRCCyN driving simulator. (b) Ultimate Renault driving simulator

The same graphics database was used in both experiments. It reproduced an open countryside driving environment. Behavioural measures (lateral position, steering angle, lateral acceleration, etc.) were recorded during the trials at 20 Hz. All trials were performed on a short section of the driving environment which comprised a straight line followed by a bend (total distance: 700 m; mean radius in the bend: 111 m) without traffic.

Procedure

LOA was simulated by modifying the adherence under the wheels when the vehicle reached a defined point in the bend. The intensity (adherence coefficient) and duration of the simulated LOA in the bend were manipulated as independent variables (IV). An adherence coefficient decrease corresponds to an increase in the intensity of LOA. These values of intensity and duration values were chosen to induce perceptible but controllable LOA simulated on four wheels (Table 3.1). The LOA situation induced a skid towards the outside of the bend. The environment did not give clues about a potential LOA (such as snow, rain or a mark on the road).

Participants were asked to keep to their lane without cutting the corner, even if there was no oncoming traffic. After a 10-minute practice session, they drove around the test bend at a predefined speed. Subjects in the first experiment were helped by the automatic gearbox and speed regulator. For the second experiment, the subjects received verbal assistance from the person conducting the experiment in order to maintain a constant speed and stay focused on steering control. Four trials without any LOA were performed in order to allow the subjects time to familiarize themselves with the task.

Conditions	C1	C2	C3	C4	C5
Adherence coefficient	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3
Duration (ms)	250	500	750	250	500
Conditions	C6	C7	C8	C9	
Adherence coefficient	0.3	0.5	0.5	0.5	
Duration (ms)	750	250	500	750	

Table 3.1: LOA conditions

Item	Question
perceived intensity	The LOA appeared to be weak/strong
perceived duration	The LOA appeared to be short/long
Danger	I perceived a danger during the bend
Control feeling	I easily kept my vehicle in the lane
Visual perception	I visually perceived the LOA
Steering wheel perception	I perceived the LOA through the steering wheel
Physical movement feeling (for static simulator)	I had the impression of physically moving
Motion rendering (for dynamic simulator)	I perceived the LOA through physical motion
Perturbation perception	Did you feel a perturbation in the bend?
Realism	Driving the simulator was unrealistic/realistic
Comfort	I was at ease during the trial

Table 3.2: Questionnaire

A control condition (no LOA) was inserted in the experimental design. A Williams Latin Squares design (E. Williams, 1949) was adopted to avoid rank and carry-over effects. Twenty trials were performed, preceded by four preliminary trials representing mild and strong LOA episodes. Those preliminary trials were conducted in order to familiarize the participants with the range of steering perturbations they would encounter

during the experiment. They were not analyzed. Moreover, the experimental design was different for each type of LOA in order to maintain perceptible but controllable situations. A 3*3 factorial design was used (Intensity: 0.1, 0.3 & 0.5; Duration: 250 ms, 500 ms & 750 ms). After each trial, a questionnaire about the subjects' perception of the event was displayed (Table 3.2). Answers to the questions were given by means of continuous horizontal scroll bars representing two ends of a continuous scale (0: totally disagree to 10: totally agree), with the exception of the question about event perception (Yes/No).

Data analysis

For each trial, a time to stability (TTS) was computed (Figure 3.2): this corresponded to the time taken by the driver after the onset of LOA to bring the vehicle speed drift back into a stability envelope. The stability envelope is defined as the average standard deviation of the speed drift measured in the control condition for all the participants. The angular drift speed (φ_{drift}) was calculated from the longitudinal speed (V_x) and the lateral speed (V_y):

$$\varphi_{drift} = \frac{d}{dt} \left(\arctan\left(\frac{V_y}{V_x}\right) \right) \quad (\text{Equation 3.1})$$

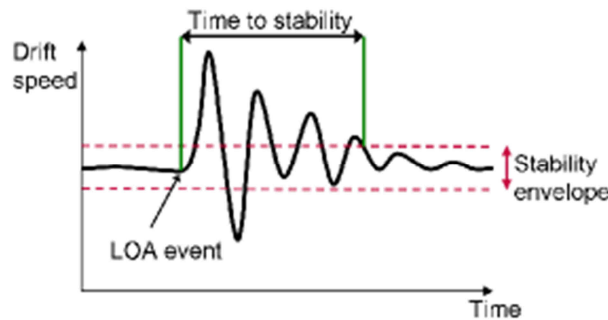


Figure 3.2: Time to stability computation after LOA episode

The maximum lateral deviation and maximum steering wheel angle were computed in the TTS interval.

Repeated measures analyzes of variance (ANOVA, $\alpha = .05$) with the intensity and the duration of the LOA as independent variables (IV) were performed on the data. Bonferroni tests were performed for post-hoc analyzes. A principal component analysis was also performed on the subjective indicators in order to determine if they could be summarized by one or several underlying factors.

3.2.3 Results

Experiment 1: Static simulator

Subjective data

The standardized principal component analysis performed on the averaged subjective data showed that all indicators can be represented by a single factor (F1: 98.7% of total variance), which means that all variables were highly correlated. The simulation was globally judged as realistic (mean score = 7.64) with no significant effect of intensity and duration.

Subjective Items	IV	F	LoS
Perceived intensity	Intensity	(2,38) = 108.47	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 1.97	n.s.
	Intensity*Duration	(4,76) = 5.35	$p < 0.05$
Perceived duration	Intensity	(2,38) = 34.78	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 21	$p < 0.05$
	Intensity*Duration	(4,76) = 4.47	$p < 0.05$
Danger	Intensity	(2,38) = 63.04	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 3.86	$p < 0.05$
	Intensity*Duration	(4,76) = 7.08	$p < 0.05$
Control feeling	Intensity	(2,38) = 89.58	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 11.36	$p < 0.05$
	Intensity*Duration	(4,76) = 8.2	$p < 0.05$
Visual perception	Intensity	(2,38) = 62.53	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 4.79	$p < 0.05$
	Intensity*Duration	(4,76) = 4.11	n.s.
Steering wheel perception	Intensity	(2,38) = 89.58	n.s.
	Duration	(2,38) = 11.36	n.s.
	Intensity*Duration	(4,76) = 8.2	n.s.
Physical movement feeling	Intensity	(2,38) = 63.04	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 3.92	n.s.
	Intensity*Duration	(4,76) = 3.84	n.s.

Table 3.3: Experiment 1 - Summary of the statistical analyzes performed on the effect of intensity and duration on all subjective variables.

Intensity and duration of LOA had a significant effect on the duration of danger perception and feeling of control (Figure 3.3–b,c,d & Table 3.3). The interaction between both IV also had a significant effect on these items. The effect of intensity and the interaction between intensity and duration on perceived intensity was significant; however, the effect of duration was not (Figure 3.3–a). Post-hoc tests confirmed that the effect of intensity on duration perceived, danger, intensity perceived and control feeling was significantly higher for longer LOA.

All the LOA situations were strongly perceived through the steering wheel in all conditions (mean value: 8.13, SD: 2.35), with no significant effect of intensity and duration (Figure 3.4-b). Conversely, the stronger the LOA, the more it was visually perceived, as shown by the significant effect of intensity and duration (Figure 3.4-a).

Although the experiment was conducted on a fixed-base simulator, a sensation of physical motion was reported, with a significant effect of intensity and no effect of duration (Figure 3.4-c).

Objective data

Intensity ($F(2,38) = 200.97, p < .05$) and duration ($F(2,38) = 57.65, p < .05$) had significant effects on the TTS (Figure 3.5-a). The interaction between both IV was also significant ($F(4,76) = 13.14, p < .05$). Post-hoc tests confirmed that the effect of intensity on TTS was significantly higher for long duration and that there was no significant effect of duration for a lower level of intensity.

Tests performed on the maximum steering wheel angle showed a significant effect of intensity ($F(2,38)=136.7, p < .05$) and duration ($F(2,38)=47.21, p < .05$), with a significant interaction between both IV ($F(4,76)=23.08, p < .05$). Similar results were observed on the maximum lateral deviation (intensity : $F(2,38)=125.48, p < .05$, duration: $F(2,38)=97.08, p < .05$; interaction: $F(4,76)=30.08, p < .05$).

Experiment 2: Dynamic simulator

Subjective data

The standardized principal component analysis performed on the average subjective data showed that all indicators can be represented by a couple of factors (F1: 77.1%, F2: 21.2% of total variance). The feeling of control is the major contributor to the second factor (94%), which means that all other variables were highly correlated, except the feeling of control. The simulation was globally judged as realistic (mean score = 7.74) with no significant effect of intensity and duration.

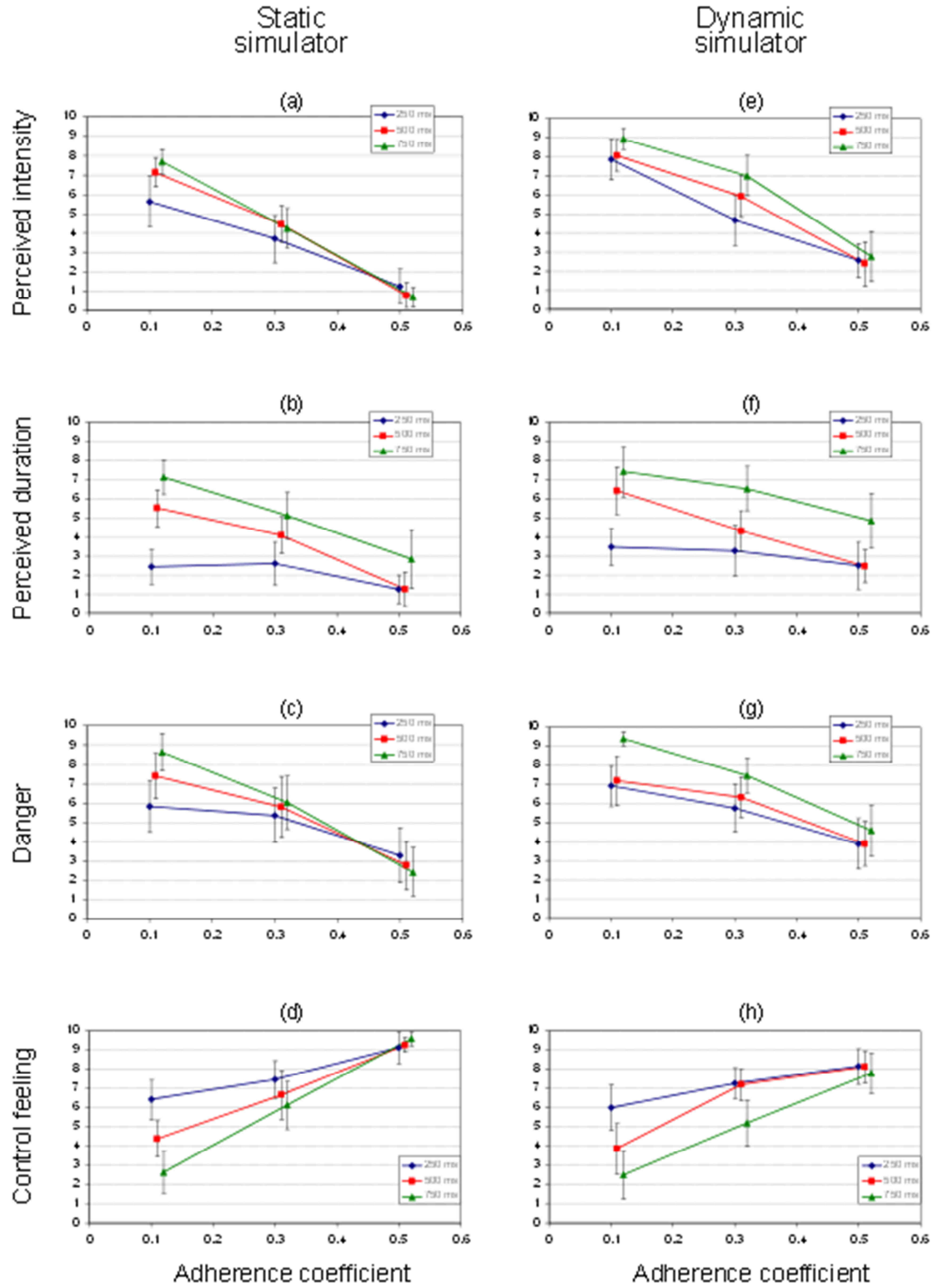


Figure 3.3: Subjective answers about intensity and duration perceived, danger and control feeling for Experiment 1 (a,b,c,d) and for Experiment 2 (e,f,g,h)

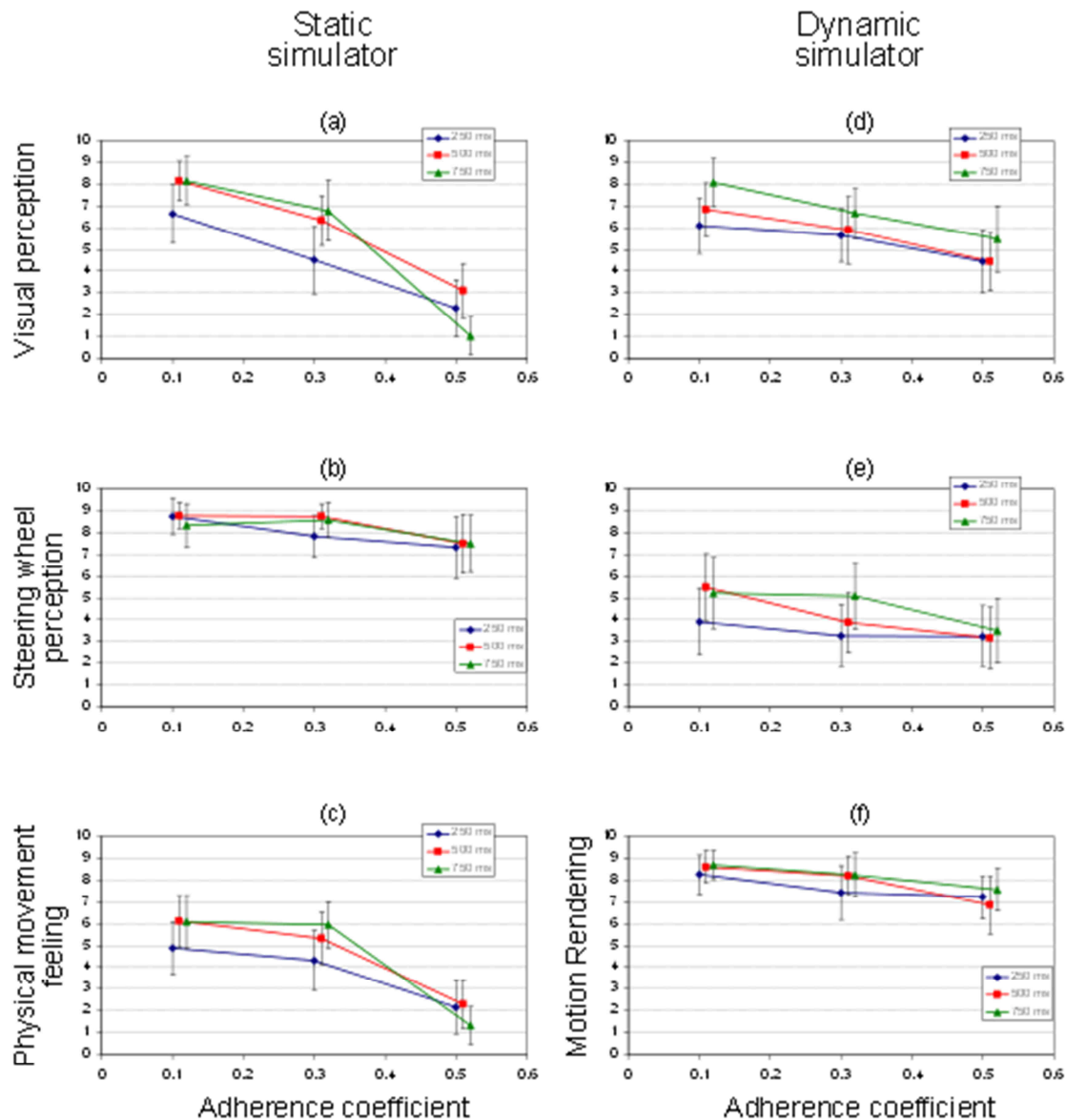


Figure 3.4: Subjective answers of visual and steering wheel perception of the LOA for Experiment 1 (a,b) and for Experiment 2 (d,e). Physical movement feeling on static simulator (c) and motion perception of the LOA on dynamic simulator

There was a significant effect of intensity and duration of LOA and a significant interaction between both IV on the control feeling (Figure 3.3h & Table 3.4). The effect of intensity and the interaction between both IV on intensity perceived was significant, but the effect of duration was not (Figure 3.3e). The effect of intensity and duration was significant on perceived duration and the danger items but the effect of the interaction between both IV was not (Figure 3.3-f,g). Post-hoc tests confirmed that the effect of intensity on control feeling was significantly higher for longer LOA but revealed that the intensity effect on perceived duration was only significant for the intermediate level of LOA duration (500 ms) and could explain the global effect.

All the LOA situations were strongly perceived through motion rendering (mean value: 7.89, SD: 2.29), with a small but significant effect of intensity (Figure 3.3-f). LOA situations were not as clearly perceived through the steering wheel (mean value: 4.1, SD: 3.39) (Figure 3.4e). As in the first experiment, the stronger the LOA, the more it was perceived through the visual channel, as shown by the significant effect of intensity and duration (Figure 3.4d).

Subjective Items	IV	F	LoS
Perceived	Intensity	(2,38) = 85.18	$p < 0.05$
Intensity	Duration	(2,38) = 3.89	$p < 0.05$
	Intensity*Duration	(4,76) = 1.03	n.s
Perceived	Intensity	(2,38) = 12.93	$p < 0.05$
Duration	Duration	(2,38) = 20.73	$p < 0.05$
	Intensity*Duration	(4,76) = 1.58	n.s
Danger	Intensity	(2,38) = 32.89	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 6.94	$p < 0.05$
	Intensity*Duration	(4,76) = 0.77	n.s
Control feeling	Intensity	(2,38) = 41.02	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 10.54	$p < 0.05$
	Intensity*Duration	(4,76) = 2.72	$p < 0.05$
Visual perception	Intensity	(2,38) = 8.09	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 3.24	$p < 0.05$
	Intensity*Duration	(4,76) = 0.19	n.s
Steering wheel perception	Intensity	(2,38) = 3.27	n.s
	Duration	(2,38) = 1.72	n.s
	Intensity*Duration	(4,76) = 0.55	n.s
Motion rendering	Intensity	(2,38) = 5.1	$p < 0.05$
	Duration	(2,38) = 0.8	n.s
	Intensity*Duration	(4,76) = 0.3	n.s

Table 3.4: Experiment 2 - Summary of the statistical analyzes performed on the effect of intensity and duration on all subjective variables.

Objective data

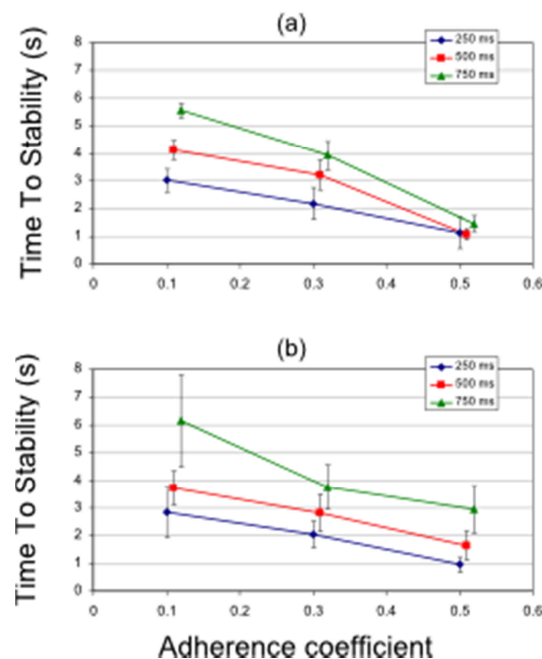


Figure 3.5: TTS indicator for static (a) and dynamic simulator (b)

Intensity ($F(2,38) = 32.65$, $p < .05$) and duration ($F(2,38) = 21.32$, $p < .05$) had significant effects on the TTS (Figure 3.5b), with no significant interaction. Post-hoc tests showed that the effect of intensity on TTS was significantly higher for long duration.

Tests performed on the maximum steering wheel angle showed a significant effect of intensity ($F(2,38)=46.9$, $p < .05$) and duration ($F(2,38)=32.04$, $p < .05$), with a significant interaction between both IV ($F(4,76)=12.16$, $p < .05$). Similar results were observed on the maximum lateral deviation (intensity: $F(2,38)=60.24$, $p < .05$, duration: $F(2,38)=48.86$, $p < .05$; interaction: $F(4,76)=12.68$, $p < .05$).

3.2.4 Discussion

The principal component analysis revealed that, in the first experiment, all subjective answers were correlated and could be described along one dimension, opposed to the adherence coefficient. The same analysis in the second experiment revealed a secondary dimension, mostly described by the feeling of control. The results suggest that subjective ratings were mainly determined by the intensity of the trajectory perturbation, highlighting a likely influence of motion rendering. It now remains to determine if the participants were able to discriminate the magnitude and duration of the manipulated LOA and whether motion rendering influenced the drivers' perception of this critical event.

In the first experiment, an effect of duration on the perceived intensity of the LOA was only observed for a higher intensity of LOA; this translated as a significant interaction between both variables with no main effect of duration. In the second experiment, the duration of LOA showed a main effect due to a slight increase of the level of intensity rating for longer LOA situations only. Interestingly, the perceived intensity was neither related to the maximum steering angle nor to the maximum lateral deviation. Since the maximum steering angle can be considered as a good indicator of the intensity of the steering correction, this suggests that subjects were able to evaluate how much adherence the vehicle lost, independently of how long it lasted and how much steering correction was needed. These results suggest that the duration of the perturbation moderately influenced the perception of LOA intensity. This was mainly determined by the actual intensity of the perturbation.

By contrast, the duration of the LOA was poorly perceived in the first experiment. The stronger the LOA, the longer it was perceived. It could be argued that the participants confused the duration of the LOA with the time needed to stabilize their vehicle: however, the clear instructions given prior to the experiment make this assumption hardly believable. A more plausible explanation is that LOA situations of high intensity were more stressful than milder ones, as confirmed by the danger ratings. Distortions of time have been observed under stress conditions, especially under life threatening conditions (Hancock & Weaver, 2005) or during specific critical tasks by paramedics (Jurkovich et al., 1987). This may be due to attentional processes. Indeed, Tse et al. (2004) proposed that novel or important events run in “slow motion” so that the information may be processed in greater depth per unit of objective time than for casual events.

Considering that the Ultimate high-performance simulator provided a stronger immersion within the driving environment, we could have expected an increase in the feeling of danger and the level of stress during LOA situations. This would have resulted in an even stronger interaction between the duration and intensity on the perceived duration. This was not observed. The interaction between intensity and duration on the perception of LOA duration disappeared and the main effect of LOA intensity was smaller than in the first experiment. A plausible explanation may reside in the nature of the event and the role of motion rendering. Indeed, the events started with a sudden LOA and ended with an equally sharp return to the normal coefficient of adherence. This created a sudden change in vehicle roll, which may have given an additional important cue to the subject regarding the beginning and the end of the event. Nevertheless, it should be noted that the participants were able to more clearly discriminate the shorter

and longer LOAs than those of intermediate duration, in which a distortion of subjective time occurred in spite of additional sensory cues.

Although visual cues are a principal source of motion perception, only the strongest LOA were clearly reported to have been perceived through visual information, especially when using a static simulator. The higher ratings observed with the Ultimate simulator for the LOA of mild intensity probably reflect visuo-vestibular interactions that come into play in the perception of self-motion (Kemeny & Panerai, 2003). Ratings concerning non-visual cues also suggest that, in this kind of sudden critical event, non-visual information is crucial. Interestingly, those results strongly differ in both experiments. LOA situations induced high lateral acceleration and yaw speed variations. The rendering of these influenced drivers' subjective answers. The first experiment clearly showed that the subjects perceived all the LOA situations mainly through the steering wheel, although some sensation of physical movement, supposedly induced by visualvection, was often reported. Conversely, the LOA events in the second experiment were clearly perceived more through physical cues and less through the steering wheel. A plausible explanation is that subjects focused on the most salient and reliable cue in each simulator. Indeed, the moving base may have enhanced the perception of skidding through inertial cues, in particular through vestibular information. By contrast, steering wheel force feedback was probably the most useful cue to detect and evaluate LOA in the fixed-base simulator. Another explanation could be technical, highlighting the limitations of driving simulators to reproduce real vehicle motion and steering wheel force feedback. Even if physical cues appeared to override visual and haptic cues through the steering wheel in the Ultimate simulator, we cannot clearly say that this is the preeminent way to detect LOA. From a technical point of view, those results highlight the importance of motion and steering wheel torque feedback to increase the fidelity of driving simulators when drivers encounter critical situations with fast changes in vehicle dynamics.

3.2.5 Conclusion

Our work contributes to the enlargement of potential applications of driving simulators, allowing them to take into account human factors within the design process. This study demonstrated that drivers are able to discriminate and correctly rank different conditions of LOA along various dimensions, both in a fixed-base and a dynamic simulator. However, dynamic high-performance simulators may provide additional sensory cues to assess intensity and duration of LOA episodes with minimal misperception. The next step is to link subjective ratings with vehicle dynamics and to compare these perceptions with the action of a simulated ESC system. This would be a

useful contribution to the development of engineering specifications of ESC systems and the evaluation of actual drivers' perception.

3.2.6 References

- Dagdelen, M., Berlioux, J. C., Panerai, F., Reymond, G., & Kemeny, A. (2006). Validation process of the ULTIMATE high-performance driving simulator. *Proceedings of DSC Europe* (pp. 37–48). Paris.
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., Reymond, G., & Kemeny, A. (2010). Drivers' perception of simulated loss of adherence in bends. In Andras Kemeny, F. Merienne, & S. Espié (Eds.), *Trends in driving simulation design and experiments* (pp. 43–53). Paris. Retrieved from <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00539685>
- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behavior. *Human Factors*, 20(6), 691–707.
- Erke, A. (2008). Effects of electronic stability control (ESC) on accidents: A review of empirical evidence. *Accident Analysis & Prevention*, 40(1), 167–173. doi:10.1016/j.aap.2007.05.002
- Hancock, P. A., & Weaver, J. L. (2005). On time distortion under stress. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 6(2), 193–211. doi:10.1080/14639220512331325747
- Hoc, J. M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(1), 22–55. doi:10.1177/155534340700100102
- Hollnagel, E. (2004). A function-centred approach to joint driver-vehicle system design (Vol. 3, pp. 2548–2551). IEEE. doi:10.1109/ICSMC.2004.1400713
- Jurkovich, G. J., Campbell, D., Padrta, J., & Luterman, A. (1987). Paramedic perception of elapsed field time. *The Journal of Trauma*, 27(8), 892–897.
- Kemeny, A. (2009). Driving simulation for virtual testing and perception studies (pp. 15–23). Presented at the Driving Simulation Conference Europe.
- Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), 31–37. doi:10.1016/S1364-6613(02)00011-6
- Lechner, D., Delanne, Y., Schaeffer, G., & Schmitt, V. (1997). *Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS: Dynamique du véhicule automobile et ferroviaire*. Ingénieurs de l'automobile. Garches, FRANCE: VB.
- Liebemann, E. K., Meder, K., Schuh, J., & Nenninger, G. (2004). Safety and Performance Enhancement: The Bosch Electronic Stability Control (ESP). SAE, (2004-21-0060).

- Mars, F. (2008). Driving around bends with manipulated eye-steering coordination. *Journal of Vision*, 8(11), 10–10. doi:10.1167/8.11.10
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? *Plenu Press*, pp. 485–520. New-York.
- Papelis, Y. ., Watson, G. ., & Brown, T. . (2010). An empirical study of the effectiveness of electronic stability control system in reducing loss of vehicle control. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 929–934. doi:10.1016/j.aap.2009.04.018
- Petiot, J.-F., & Yannou, B. (2004). Measuring consumer perceptions for a better comprehension, specification and assessment of product semantics. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 33(6), 507–525. doi:10.1016/j.ergon.2003.12.004
- Reymond, G., Droulez, J., & Kemeny, A. (2002). Visuovestibular perception of self-motion modeled as a dynamic optimization process. *Biological Cybernetics*, 87(4), 301–314. doi:10.1007/s00422-002-0357-7
- Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., & Berthoz, A. (2001). Role of Lateral Acceleration in Curve Driving: Driver Model and Experiments on a Real Vehicle and a Driving Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 43(3), 483–495. doi:10.1518/001872001775898188
- Strigler, F., Touraille, C., Sauvageon, F., Barthelemy, J., & Issanchou, S. (1998). Les épreuves. *évaluation sensorielle : manuel méthodologique* (Lavoisier.). Depledt F. & Strigler F.
- Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., & Droulez, J. (2007). Role of steering wheel feedback on driver performance: driving simulator and modeling analysis. *Vehicle System Dynamics*, 45(4), 375–388. doi:10.1080/00423110601058874
- Tse, P. ., Intriligator, J., Rivest, J., & Cavanagh, P. (2004). Attention and the subjective expansion of time. *Perception & Psychophysics*, 66(7), 1171–1189.
- Watson, G., Papelis, Y., & Ahmad, O. (2006). Design of Simulator Scenarios to Study Effectiveness of Electronic Stability Control Systems. *Transportation Research Record*, 1980(1), 79–86. doi:10.3141/1980-13
- Wierwille, W. W., Casali, J. G., & Repa, B. S. (1983). Driver steering reaction time to abrupt-onset crosswinds, as measured in a moving-base driving simulator. *Human Factors*, 25(1), 103–116.
- Williams, E. (1949). Experimental Designs Balanced for the Estimation of Residual Effects of Treatments. *Australian Journal of Chemistry*, 2(2), 149. doi:10.1071/CH9490149

CHAPITRE 4

Modélisation des évaluations subjectives

4.1 Prédiction de l'évaluation subjective des pertes d'adhérence en virage – Quels indicateurs objectifs observer ?

Nous venons de voir dans les chapitres précédents la capacité des conducteurs non-experts à évaluer subjectivement différents épisodes de perte d'adhérence sur simulateur (CHAPITRE 2 et CHAPITRE 3). La méthode utilisée permet ainsi de caractériser subjectivement le comportement du véhicule dans une situation donnée. Ces évaluations subjectives traduisent les modifications dynamiques du comportement du véhicule et les réactions du conducteur en réponse à ces situations. Nous avons donc, dans la suite des travaux, tenté de modéliser la relation entre les évaluations subjectives (« Maitrise », « intensité », « danger », ...) des conducteurs et les mesures objectives liées à la dynamique du véhicule (Accélération latérale, vitesse de lacet, ...) afin de pouvoir prédire ces évaluations.

4.1.1 Introduction

Depuis le développement de la psychophysique dans le milieu du 19^{ème} siècle, mesurer la perception humaine a toujours été un défi. L'émergence des approches méthodologiques de conception dites « centrées utilisateurs », dans les dernières décennies, ont mis en évidence la nécessité de proposer des méthodes et des standards pour mesurer cette perception (Rossi et Berglund, 2011). De nombreuses méthodes ont été mise au point et sont utilisés dans des domaines variés tels que l'agro-alimentaire, le textile ou bien la cosmétique (Frey et Patil, 2002), mais peu de choses ont été faites dans le domaine de la dynamique du véhicule.

La perception du comportement dynamique de son véhicule est un phénomène complexe qui met en jeu plusieurs modalités sensorielles et s'effectue dans un système en boucle fermée où, dans un même temps, elle est influencée et influence les actions du conducteur pour contrôler sa trajectoire. De plus l'influence et le poids des informations sensorielles utilisées pour la conduite et plus généralement pour la perception du mouvement propre sont encore débattus.

Nous proposons dans cette étude de développer des modèles pour expliquer les descripteurs subjectifs (Table 4.1) issues des évaluations précédentes (CHAPITRE 2 et CHAPITRE 3) et déterminer quels indicateurs objectifs (Table 4.2) contribuent le plus à la précision des prédictions.

4.1.2 Méthodes

Les données subjectives et objectives issues des deux premières expérimentations (CHAPITRE 2 et CHAPITRE 3) ont été utilisées pour la modélisation. Pour chaque item subjectif et chaque simulateur nous avons un jeu de 180 observations. Une validation « hold-out » est utilisée pour évaluer les capacités prédictives de chaque modèle c'est-à-dire que chaque jeu de données est séparé en deux échantillons de 90 observations, un pour l'apprentissage et l'autre pour la validation.

Nous faisons l'hypothèse que la relation stimuli-perception de chaque indicateur objectif est basée sur une loi logarithmique (Weber-Fechner) et que la perception des descripteurs subjectifs est une somme pondérée de la perception de chaque indicateur objectif.

Des modèles de régression linéaire multiple ont été déterminés pour chaque indicateur subjectif à partir des données obtenues sur simulateur statique (CHAPITRE 2) et dynamique (CHAPITRE 3). Les indicateurs objectifs retenus pour chaque modèle, ont été sélectionnés par une procédure « step-by-step » selon le critère AIC (Aikaike Information Criterion).

Afin d'estimer la qualité de l'ajustement linéaire des modèles nous avons utilisé trois indicateurs : le coefficient de régression (R^2) qui représente le pourcentage de variance expliqué, la *p-value* du test de Fisher, et le pourcentage d'erreur absolu moyen (MAPE) qui représente la précision de prédiction du modèle. Pour évaluer la qualité des prédictions, nous avons calculé la confiance prédictive (PC), qui mesure les chances de gain du modèle par rapport à un modèle qui prédirait toujours une valeur moyenne. Nous avons également calculé le coefficient de corrélation de Pearson.

4.1.3 Discussion

L'utilisation de modèles mathématiques basés sur des principes psychophysiques connus (loi de Weber-Fechner) nous a permis d'évaluer la relation entre des jugements subjectifs et la dynamique du véhicule pour des épisodes de perte d'adhérence. Les modèles testés ont permis d'expliquer plus de 50% de la variance pour la moitié des descripteurs subjectifs.

L'utilisation du critère de sélection AIC a permis de réduire à deux éléments explicatifs le modèle pour chaque descripteur subjectif. Cela nous permet d'identifier pour chacun et pour chaque simulateur les deux variables objectives les plus contributrices (Table 4.3 et Table 4.4). Les différences observées sur la composition des

modèles entre le simulateur statique et le simulateur notamment pour l'« intensité perçue » suggèrent une réelle influence des informations inertielles pour juger ces situations. Excepté pour le descripteur « danger », les variables sélectionnées pour expliquer chaque descripteur subjectif sont différentes selon la présence ou non de restitution de mouvement. Malgré le faible pourcentage de variance expliqué pour le descripteur « danger » sur les deux simulateurs, il est intéressant de noter que le niveau d'accélération latérale et la correction d'angle volant sont les principales variables explicatives. Cela soutient l'idée proposée par Reymond et al. (2003) sur le contrôle par le conducteur d'une marge de sécurité variable sur l'accélération perçue en fonction de l'anticipation de leur écart de trajectoire.

Pour chaque simulateur, les descripteurs « intensité perçue » et « maîtrise » sont les mieux expliqués. Néanmoins, le modèle linéaire explique plus de variance pour les données issues du simulateur statique (~70%) que pour le simulateur dynamique (~50%). L'utilisation de modèles linéaires simples semble insuffisante pour bien expliquer le phénomène reproduit sur le simulateur dynamique. La complexité des stimuli envoyés au conducteur, plus proche d'une situation de conduite réelle, et notamment, dans notre cas, les interactions visuo-vestibulaires (Kemeny et Panerai, 2003), nécessiterait le choix de modèles avec interactions.

Contrairement à la meilleure capacité explicative des modèles pour le simulateur statique, les indicateurs montrent une qualité des prédictions supérieure sur le simulateur dynamique pour les descripteurs « intensité perçue » et « maîtrise ».

Par ailleurs, la sélection de variables explicatives nous permet de recueillir des indications pour améliorer la restitution du mouvement sur simulateur en fonction de la tâche à effectuer, dans ce cas, l'accélération latérale et le lacet.

Bien que de nombreux efforts soient encore nécessaires pour optimiser les modèles et élargir cette approche à différentes situations, ces premiers résultats ouvrent de nouvelles pistes pour l'utilisation des simulateurs de conduites dans les processus de conception.

4.2 Manuscrit modélisation

Predicting the subjective evaluation of drivers in a driving simulator during loss of adherence

Thomas Denoual^{1,2}, Jean-François Petiot², Franck Mars², Gilles Reymond¹, Andras Kemeny^{1,3}

1, RENAULT, Technical Center for Simulation, 1 avenue du golf – 78288 Guyancourt, France

2, LUNAM Université, CNRS, Ecole Centrale de Nantes, IRCCyN (Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes), 1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France

3, Arts et Métiers ParisTech, Institut Image, 2, rue Thomas Dumorey 71100 Chalon-sur-Saône, France

Résumé

Cet article étudie la possibilité d'utiliser des indicateurs objectifs pour prédire l'évaluation subjective d'un conducteur dans un simulateur. Des situations de perte d'adhérence ont été contrôlées et modulées, en intensité et en durée, sur un simulateur statique et un simulateur dynamique. Des analyses par régression multiple ont été effectuées en utilisant les évaluations subjectives des participants comme variables dépendantes et les variables objectives physiques des interactions conducteur / véhicule comme variables indépendantes. Les résultats donnent les variables les plus contributives à la précision des modèles prédictifs pour chaque variable subjective, par exemple : l'accélération latérale et la vitesse de lacet pour l'item "Maîtrise". Ils soulignent également la cohérence de notre approche et l'influence du rendu mouvement sur la perception de l'intensité des pertes d'adhérence. Une méthode semblable pourrait être utilisée pour évaluer la perception de différentes configurations de systèmes électronique de contrôle de stabilité (ESC).

Abstract

This paper investigates the possibility of using objective indicators to predict the subjective evaluation of a driver in a simulator. Situations of loss of adherence (LOA) were controlled and modulated in intensity and duration on a static and on a dynamic simulator. Multiple regression analyses were performed using the subjective evaluations of participants as the dependent variable, and the objective physical variables of the interaction driver/vehicle as the independent variables. The results assigned the most contributive variables to the accuracy of the model's prediction for each subjective item, lateral acceleration and yaw rate for "control feeling". They also underlined the consistency of our approach and the influence of motion rendering on the perception of LOA intensity. A similar method could be used to evaluate the perception of various configurations of electronic stability control (ESC) systems.

4.2.1 Introduction

Electronic Stability Control (ESC) is an advanced driving assistance system (ADAS) that dynamically corrects vehicle trajectory according to the driver's intentions in emergency situations (Erke, 2008; Liebmenn et al., 2004). It is particularly useful in cases of loss of adherence (LOA) in bends that are caused by excessive speed or a change in road grip, and can help to maintain vehicle control. The calibration and validation processes of ESC systems are time consuming. They require the development of physical prototypes based on expert drivers and specific terrain, especially for low adherence situations. Understanding drivers' perceptions of and reactions to LOA situations would be useful for the engineering specification of ESC. Driving simulators are useful tools in vehicle design and perceptual studies. They allow the safe exploration of critical situations with naive drivers and without environmental bias (Kemeny, 2009). Consequently, driving simulators are being used to study LOA episodes and ESC performance (Papelis et al., 2010; Watson et al., 2006). This study aimed at evaluating the possibility of using objective indicators to predict the subjective evaluation of vehicle behaviour in a simulator.

Measuring human perception has been a major challenge since the middle of the 19th century. In recent decades, with the emergence of human-centred design approach (Rossi & Berglund, 2011), there has been a clear need to provide measurement standards and methods. Numerous sensitivity analysis methods have been proposed and used in various fields (Frey & Patil, 2002). These methods, together with the relationship between stimuli and sensory response, have been widely investigated in areas such as textile (Giboreau et al., 2001) and food quality (Skovgaard, 1995; A. A. Williams, 1994). Multiple linear regression models based on the Weber-Fechner law seem to give good results for predicting textile quality (Mazzuchetti et al., 2008) or food preferences (Cliff et al., 1995). However little has been done in the field of vehicle dynamics. We thus propose to explore the use of this approach to explain and predict drivers' perceptions of LOA situations.

This paper presents two driving simulator experiments in which episodes of LOA were triggered to produce significant modifications of the vehicle trajectory without loss of control and road departure. Intensity and duration of the LOA were manipulated. Previous studies (Denoual et al., 2010, 2011) have focused on developing an evaluation method to describe LOA episodes by means of subjective indicators using a non-structured-scaled questionnaire (Strigler et al., 1998) and determining to what extent objective and subjective indicators were related (Petiot & Yannou, 2004).

In this study, the first objective was to develop models to explain each subjective item from the questionnaire and to determine which objective variables contributed the most to the accuracy of the predictions. Another objective was to determine the influence of motion rendering on the selected models and their predictions.

4.2.2 Materials and Methods

Participants

Static simulator

A total of 20 participants (4 females, 16 males) aged between 20 and 24 (mean age: 21.4) participated in the first experiment on the static simulator. They had held a driving license for 3.4 years on average and drove between 1000 and 25000 km per year (mean: 6325 km).

Dynamic simulator

A total of 20 participants (5 females, 15 males) aged between 19 and 58 years old (mean age: 36.8) participated in the second experiment. They had held a driving license for 16.7 years on average and drove between 1000 and 40000 km per year (mean: 17538 km).

Procedure

The same graphics database was used in both experiments. It reproduced an open countryside driving environment. Behavioural measures (lateral position, steering angle, lateral acceleration, etc.) were recorded during the trials at 20 Hz. All trials were performed on a short section of the driving environment, which comprised a straight line followed by a bend (total distance: 700 m; mean radius in the bend: 111 m) without traffic.

Modifying the adherence under the wheels when the vehicle reached a defined point in the bend yielded LOA. The intensity (adherence coefficient) and duration of the simulated LOA in the bend were manipulated as independent variables (IV). An adherence coefficient decrease corresponds to an increase in the intensity of LOA. These values of intensity and duration values were chosen to induce perceptible but controllable LOA simulated on the four wheels. The LOA situation induced a skid towards the outside of the bend. The environment did not give clues about a potential LOA (such as snow, rain or a mark on the road).

Participants were asked to keep to their lane without cutting the corner, even if there was no oncoming traffic. After a 10-minute practice session, they drove around the test bend at a predefined speed. An automatic gearbox and a speed regulator helped subjects in the first experiment. For the second experiment, the subjects received verbal assistance from the person conducting the experiment, in order to maintain a constant speed and stay focused on steering control. Four trials without any LOA were performed first in order to offer the participants the time to familiarize themselves with the task. For the LOA, a 3*3 factorial design was used (3 levels of intensity: 0.1, 0.3 & 0.5; 3 levels of duration: 250 ms, 500 ms & 750 ms). Nine experimental trials followed four preliminary trials representing mild and strong LOA episodes. The preliminary trials were conducted in order to familiarize the participants with the range of steering perturbations they would encounter during the experiment, but they were not analysed. A Williams Latin Squares design (Williams, 1949) was adopted to control rank and carry-over effects. After each trial, a questionnaire about the subjects' perception of the event was displayed. As a first approach, the items were chosen to evaluate LOA perception using "actual" drivers rather than professional expert drivers. The latter are commonly used to evaluate the dynamic handling of a car during the design process.

Thus, a voluntary choice was made to use nontechnical vocabulary. Two items were about the perception of the LOA itself (intensity and duration) and two others about its consequences in terms of perceived danger and feeling of control (Table 4.1). The aim here was not to use an extensive vocabulary to evaluate the participants' perceptions in detail, but to evaluate a method that relies on subjective and objective indicators.

Subjective item	Question
perceived intensity	The LOA appeared to be weak/strong
perceived duration	The LOA appeared to be short/long
Danger	I perceived a danger during the bend
Control feeling	I easily kept my vehicle in the lane

Table 4.1: Questionnaire and definition of the rating scales for the LOA (Variable Y_{ij})

Answers to the questions were given by means of continuous horizontal scroll bars representing two ends of a continuous scale (0: totally disagree to 10: totally agree).

Objective indicators

Three types of objective indicators can describe a driving situation: vehicle dynamics, driver's inputs and environmental indicators. The latter are even more easily recordable or computable in a driving simulator where the environment is managed. The

specific case of LOA induces significant variations in vehicle dynamics and requires an appropriate response from the driver to keep the vehicle on the road.

For each trial, a time to stability (TTS) was computed. It corresponds to the time taken by the driver after the onset of LOA to bring the vehicle speed drift back into a stability envelope. The stability envelope is defined as the average standard deviation of the speed drift measured in the control condition for all the participants. The angular drift speed (Equation 1) was calculated from the longitudinal speed (V_x) and the lateral speed (V_y):

$$\phi_{drift} = \frac{d}{dt} \left(\arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right) \right) \quad (\text{Equation 4.1})$$

Objective indicator	Unit	Acronym
Time to stability	Seconds	TTS
Maximum lateral acceleration	Meters.seconds ⁻²	LA
Maximum slip angle	Degrees	SA
Maximum heading speed	Degrees.seconds ⁻¹	HS
Maximum steering wheel angle	Degrees	SW
Maximum lateral deviation	Meters	LD
Root mean square of the lateral deviation	Meters	LDrms

Table 4.2: Definition of the objective indicators (variables X_i)

According to the consequences of an LOA event on vehicle behaviour, pertinent indicators were computed in the TTS interval. The maximum lateral acceleration (LA, in m.s-2), maximum slip angle (SA, in deg), maximum heading speed (HS, in deg.s-1) and TTS were chosen for the vehicle dynamics; the maximum steering wheel angle (SW, in deg) for drivers' inputs; and the maximum lateral deviation (LD, in m) and root mean square of the lateral deviation during TTS (LDrms, in m) for the environmental indicators (Table 4.2).

Apparatus

Static simulator

The first experiment was conducted on a fixed-base simulator at the IRCCyN laboratory (Figure 4.1a). It consists of a compact size passenger car with actual instrument panel, clutch, brake and accelerator pedals, handbrake, ignition key and an

adjustable seat with seat belt. It is equipped with a TRW© active steering system for realistic "scale one" force-feedback. Transmission was carried out using an automatic gearbox. Vibrators are installed underneath the driver seat and upper position of the steering column to render engine noise and vibrations. The audio system reproduces the audio environment for an interactive vehicle. It comprises an amplifier, four speakers and a subwoofer



Figure 4.1: (a) IRCCyN driving simulator. (b) Ultimate Renault driving simulator

The SCANeR©II software package was used with the CALLAS© dynamic vehicle model (Lechner et al., 1997). The visual environment was displayed on three 32-inch LCD monitors, each with a resolution of 1280 x 720. One monitor was positioned in front of the driver, with two laterals inclined at 45° from the front one, viewed from a distance of about 1 m and covering 115° of visual angle. A simple generic speed regulator was used, consisting of a PID corrector with a nominal speed of 75 km/h, using the automatic gearbox mode in order to reject inter-subject velocity bias. This also allowed the subject to concentrate on the steering task.

Dynamic simulator

The second experiment was conducted on the high-performance dynamic Ultimate simulator (Dagdelen et al., 2006) at the Renault Technical Center for Simulation (Fig. 1b). It consists of a compact size passenger car based on a real Laguna interior

design. The cab is mounted on a large X-Y table and a hexapod motion system to render physical accelerations and rotations. Transmission is carried out using a manual gearbox. A system of sound synthesis is used to reproduce engine noise and the audio environment for an interactive vehicle. Active steering force feedback is computed by a proprietary model and reproduced by a TRW electric power steering system.

The SCANeR© Studio software package was used with a real-time version of the MADA (Advanced Modeling of Vehicle Dynamic) vehicle dynamic software, developed by RENAULT. The visual environment was displayed on a cylindrical screen (radius 1.9 m) by three single-chip DLP projectors, each with a resolution of 1024 x 768. The system covers a visual angle of 150°. Speed regulation was unavailable for this experiment.

4.2.3 Data Analysis

The objective indicators mentioned above are composed of a set of basic properties i , for which a measured value X_i has been obtained. Each basic property can be considered as a stimulus that may be perceived by the driver, and may create an associated sensation A_i . It is said that the Weber-Fechner law can be applied to represent the relation between a stimulus and its sensory response in a fairly wide area of this stimulus. We hypothesize that the Weber-Fechner law is also valid for the study of such a complicated stimulus as basic property i . Thus, we used a logarithmic transformation on the measured values X_i to obtain A_i , objective variables used in the next modeling step.

The purpose of this study was not to find all the parameters for each basic property. We concentrated on “high level” subjective descriptors, which enable us to describe the situation from a non-expert driver point of view. In order to simplify the method, we assume that the perception of these descriptors is a weighted sum of the basic properties. Let j be a subjective descriptor and Y_j the magnitude of its sensation, we propose a multivariable linear model, where Y_j is the dependent variable and A_i are the independent variables:

$$\hat{Y}_j = \beta_{0j} + \sum \beta_{ij} \cdot A_i \quad (\text{Equation 4.2})$$

Multiple linear regression models were determined to predict each subjective descriptor from both static and dynamic simulator data. The selection of the best model was made with a step-by-step procedure according to the AIC criterion (Akaike information criterion, a measure of the relative goodness of fit of models - best model selection procedure; STATISTICA, 2004).

Parameters estimates for all models were tested using t-test. To evaluate the quality of the models, we used a two-fold validation procedure. For each subjective descriptor and each simulator, we have a dataset of 180 observations (20*9). We split it randomly into two blocks of N=90 observations, the first one to determine the multiple regression models (training) and the second one to evaluate the predictive capabilities of the models (holdout validation).

Three indicators were used to estimate the quality of the linear adjustment:

- The determination coefficient of the regression R^2 . It represents the percentage of variance taken into account by the linear model,
- The *p-value* of the Fisher's test (variance analysis – significance of the model),
- The Mean Absolute Percentage Error (*MAPE*). It represents the forecast accuracy of the model (equation 3): smaller the *MAPE*, better the forecast accuracy. *MAPE* is a measure of how high or low are the differences between the predictions and actual data. For e.g. 15% *MAPE* means on average the predictions from a model will be 15% higher or lower than actual. The *MAPE* was computed on the validation set.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|\hat{Y}_{kj} - Y_{kj}|}{Y_{kj}} \quad (\text{Equation 4.3})$$

The *MAPE* can be compared to the *MAPE_n* of a « naive » model, which would simply predict the average value of all the data, for each observation.

$$MAPE_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|\bar{Y} - Y_{kj}|}{Y_{kj}} \quad (\text{Equation 4.4})$$

To assess the quality of the model, we propose to compute the predictive confidence, a measure of the improvement gained by the model over chance. The predictive confidence is defined by:

$$P\alpha(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{MAPE}{MAPE_n}\right) \quad (\text{Equation 4.5})$$

We also compute the Pearson coefficient correlation (*r*) between the predicted values \hat{Y}_j by the models and the actual observed values Y_j on the validation sample, to evaluate the quality of the predictions.

4.2.4 Results

For each subjective variable Y_j , a two variables model was choose according to the AIC criterion (Eq.6).

$$Y_j = \beta_0 + \beta_1 A_1 + \beta_2 A_2 \quad (\text{Equation 4.6})$$

In the followings tables, all parameters are given with their standard deviation for each multiple regression linear model on the static (Table 4.3) and the dynamic simulator (Table 4.4). For each subjective variable A_i , the standardized coefficient (β_i^*) is given to show the more contributive variable of each model. Residuals analyses have been performed to check basic hypotheses of the generalized analysis.

Y_j	β_0	SD	β_1	SD	β_1^*	A_1	β_2	SD	β_2^*	A_2	F	p	R^2
Perceived Intensity	-8.49	3.34	2.41	0.57	0.53	SA	3.45	1.36	0.32	HS	91.38	<.05	0.68
Perceived duration	-	4.34	3.97	0.98	0.62	SW	-	0.48	-	LDrms	14.81	<.05	0.25
	12.69						0.49		0.16				
Danger	-	2.60	3.80	2.13	0.32	LA	2.42	1.37	0.32	SW	2.30	<.05	0.39
	11.94												
Control feeling	28.38	2.94	-	0.41	-	TTS	-	1.13	-	HS	99.88	<.05	0.70
			0.49		0.13		7.55		0.72				

Table 4.3: Models parameters, selected objective variables and statistics of multiple linear regressions for subjective variables on static simulator

Y_j	β_0	SD	β_1	SD	β_1^*	A_1	β_2	SD	β_2^*	A_2	F	p	R^2
Perceived intensity	-	2.77	6.62	1.18	0.53	LA	3.57	1.28	0.26	HS	46.36	<.05	0.52
	17.90												
Perceived duration	8.68	3.58	-	2.72	-	LA	7.74	0.48	0.13	SA	23.02	<.05	0.35
			6.73		0.62								
Danger	-	3.98	4.71	1.19	0.42	LA	2.50	1.20	0.22	SW	22.20	<.05	0.38
	13.57												
Control feeling	26.64	2.55	-	0.64	-	SA	-	1.11	-	HS	44.20	<.05	0.50
			0.86		0.13		6.90		0.62				

Table 4.4: Models parameters, selected objective variables and statistics of multiple linear regressions for subjective variables for dynamic simulator

The followings tables give the results of the MAPE criteria (equation 3), the predictive confidence (equation 5) and the coefficient correlation between predicted and actual values for each model on static (Table 4.5) and dynamic simulator (Table 4.6).

Yj	MAPE	Pc	r
Perceived intensity	0.72	45.57	0.77
Perceived duration	0.93	23.76	0.58
Danger	0.82	30.92	0.55
Control feeling	0.30	55.38	0.77

Table 4.5: MAPE, Pc and coefficient correlation indicators for model forecast on static simulator

Yj	MAPE	Pc	r
Perceived intensity	0.43	42.70	0.74
Perceived duration	0.48	36.52	0.58
Danger	0.63	12.88	0.62
Control feeling	0.38	50.55	0.77

Table 4.6: MAPE, Pc and coefficient correlation indicators for model forecast on dynamic simulator

Figure 4.2 represents the correlation between observed and predicted scores for all subjective indicators on the static and the dynamic simulators for the evaluation data sample.

A significant between-subject effect was observed (Table 4.7) on the subjective items for both experiments, except on “perceived intensity”.

Yj	Without motion base		With motion base	
	H	Sig.	H	Sig.
Perceived intensity	26.63	n.s	20.63	n.s
Perceived duration	34.84	p<.05	34.84	p<.05
Danger	83.8	p<.05	48.19	p<.05
Control feeling	34.58	p<.05	41.42	p<.05

Table 4.7: Kruskal-Walis test results for between-subject effect on subjective items; $df=19$ and $n=90$ for each experiment

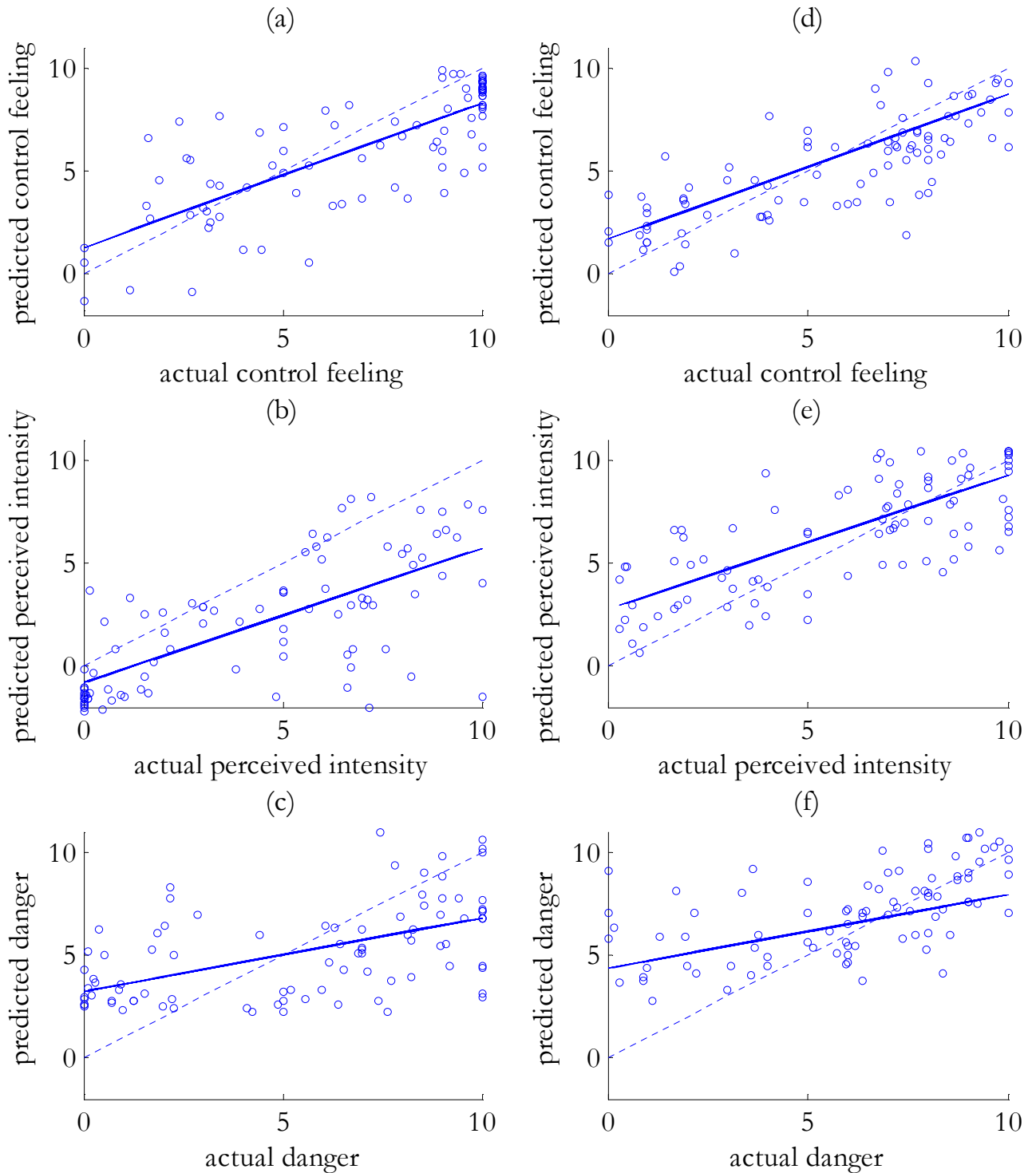


Figure 4.2: Correlation between actual and predicted scores for control feeling (Eq. 9 & 13), perceived intensity (Eq.6 & 10) and danger (Eq.8 & 12) ($n=90$) for static (a,b,c) and dynamic (d,e,f) simulator. Solid line: actual correlation, dotted line: perfect correlation

4.2.5 Discussion

The first objective of the study was to evaluate how the chosen models could explain the variability of the subjective items and which objective variable was the most influential in each model. The results of the model selection method applied on the subjective items showed similar trends with both the static and dynamic simulators in terms of explanation capabilities. The models were able to explain more than 50 % of the variability for perceived intensity and feeling of control. However, poorest results were observed for perceived duration (static: $R^2 = 0.25$ and dynamic: $R^2 = 0.35$) and danger (static: $R^2 = 0.39$ and dynamic: $R^2 = 0.38$). This could be explained by the large between-subjects variability observed on these items.

Heading speed was the second contributive variable for explaining perceived intensity in both dynamic and static simulators. This suggests that heading speed variation had a primary influence in detecting and assessing variation of LOA intensity. Interestingly, the most contributive variable in the models differed in both experiments. On the static simulator, the slip angle was the most contributive variable, while the lateral acceleration dominated on the dynamic simulator. This suggests that the perception of LOA intensity was mostly influenced by vestibular and other inertial cues. However, in the absence of motion rendering, drivers principally relied on visual cues to estimate the strength of the LOA.

The feeling of control was mainly influenced by heading speed variation, in both the static and dynamic simulators. In both cases, the second contributive variable has a very weak normalized coefficient. This suggests that heading speed variation was the most influent variable in explaining the subjective assessment of feeling of control.

As suggested by a previous study (Denoual et al., 2011), the duration of the LOA was poorly perceived in the simulator, which could explain the poor fit of the model. This also does not allow us to discuss the selected contributive objective variables, which differed in both experiments. The models obtained for perceived danger did not show a much larger explanatory power, but the same objective variables contributed the most for both simulators. The level of lateral acceleration and quantity of steering wheel angle needed to correct the trajectory had a primary influence on perceived danger. This supports the idea that drivers control a variable safety margin of perceived lateral acceleration according to their anticipated steering deviations when negotiating bends (Reymond et al., 2001).

From a global point of view, the models obtained with the static simulator explained more variability than those obtained in the dynamic condition. A plausible

explanation is that the static simulator gave fewer cues to subjectively assess LOA events and that a simple multiple linear regression model is sufficient to fit the data. Through motion rendering, the dynamic simulator provided more complex stimuli to the driver, closer to a real driving situation. Models with interactions should be preferred, especially to take into account visuo-vestibular interactions that come into play in the perception of self-motion (Kemeny & Panerai, 2003). In this case a linear model may not be sufficient.

It remains now to examine the capabilities of the selected models to predict new scores. Even if the selected models for both static and dynamic simulators were not able to capture all the variability of subjective items assessment, they gave good correlation scores (around 0.75) for predicting values of perceived intensity and feeling of control. For feeling of control, errors in prediction (as measured by the MAPE) were quite similar in the static and dynamic conditions. This suggests that motion rendering had little influence on this subjective item. Given that the variation of heading speed was the most contributive variable, the fidelity of the heading motion restitution should be investigated. For perceived intensity, errors in prediction are markedly better in the dynamic condition (MAPE = 0.43) than in the static condition (MAPE = 0.72); again, this suggests a determining influence of motion rendering on the perception of LOA intensity. The selected models for predicting perceived duration and danger have coefficients of correlation that are too small; thus, further investigations will be necessary to improve them.

The predictive confidence values are the highest for “perceived intensity” and “feeling of control”. For both simulators, these subjective items are predicted with the highest accuracy. For all subjective items, we noticed that the predictive confidence values are in the same range for both static and dynamic simulator. This underlines the consistency of our approach.

4.2.6 Conclusion

Multiple regression analyses were used to evaluate the relations between the subjective judgments and the vehicle dynamics for loss of adherence episodes. Mathematical models based on established psychophysical principles (the Weber-Fechner law) were tested. They were able to explain more than 50% of the variance for two subjective items out of four. This study highlights the objective indicators of vehicle behaviour that influence the variation of each subjective indicator the most. This study is a preliminary approach to objectivize drivers' perceptions and to help the tuning of ADAS

by means of a simulator. Further research is planned to optimize the model prediction in various situations. A similar method might be used to objectivize how drivers perceive various configurations of ESC.

4.2.7 Bibliography

- Cliff, M. ., Dever, M. ., Hall, J. ., & Girard, B. (1995). Development and evaluation of multiple regression models for prediction of sweet cherry liking. *Food Research International*, 28(6), 583–589. doi:10.1016/0963-9969(95)00041-0
- Dagdelen, M., Berlioux, J. C., Panerai, F., Reymond, G., & Kemeny, A. (2006). Validation process of the ULTIMATE high-performance driving simulator. *Proceedings of DSC Europe* (pp. 37–48). Paris.
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., Reymond, G., & Kemeny, A. (2010). Drivers' perception of simulated loss of adherence in bends. In Andras Kemeny, F. Merienne, & S. Espié (Eds.), *Trends in driving simulation design and experiments* (pp. 43–53). Paris. Retrieved from <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00539685>
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., Reymond, G., & Kemeny, A. (2011). Drivers' Perception of Loss of Adherence in Bends: Influence of Motion Rendering. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11(4), 041004. doi:10.1115/1.3622752
- Erke, A. (2008). Effects of electronic stability control (ESC) on accidents: A review of empirical evidence. *Accident Analysis & Prevention*, 40(1), 167–173. doi:10.1016/j.aap.2007.05.002
- Frey, C. ., & Patil, S. . (2002). Identification and Review of Sensitivity Analysis Methods. *Risk Analysis*, 22(3), 553–578. doi:10.1111/0272-4332.00039
- Giboreau, A., Navarro, S., Faye, P., & Dumortier, J. (2001). Sensory evaluation of automotive fabrics. *Food Quality and Preference*, 12(5-7), 311–322. doi:10.1016/S0950-3293(01)00016-7
- Kemeny, A. (2009). Driving simulation for virtual testing and perception studies (pp. 15–23). Presented at the Driving Simulation Conference Europe.
- Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), 31–37. doi:10.1016/S1364-6613(02)00011-6
- Lechner, D., Delanne, Y., Schaeffer, G., & Schmitt, V. (1997). *Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS: Dynamique du véhicule automobile et ferroviaire*. Ingénieurs de l'automobile. Garches, FRANCE: VB.
- Liebemann, E. K., Meder, K., Schuh, J., & Nenninger, G. (2004). Safety and Performance Enhancement: The Bosch Electronic Stability Control (ESP). SAE, (2004-21-0060).

- Mazzuchetti, G., Demichelis, R., Songia, M. B., & Rombaldoni, F. (2008). Objective Measurement of Tactile Sensitivity Related to a Feeling of Softness and Warmth. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, 16(4), 67–71.
- Papelis, Y. ., Watson, G. ., & Brown, T. (2010). An empirical study of the effectiveness of electronic stability control system in reducing loss of vehicle control. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 929–934. doi:10.1016/j.aap.2009.04.018
- Petiot, J.-F., & Yannou, B. (2004). Measuring consumer perceptions for a better comprehension, specification and assessment of product semantics. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 33(6), 507–525. doi:10.1016/j.ergon.2003.12.004
- Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., & Berthoz, A. (2001). Role of Lateral Acceleration in Curve Driving: Driver Model and Experiments on a Real Vehicle and a Driving Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 43(3), 483–495. doi:10.1518/001872001775898188
- Rossi, G., & Berglund, B. (2011). Measurement involving human perception and interpretation. *Measurement*, 44(5), 815–822. doi:10.1016/j.measurement.2011.01.016
- Skovgaard, I. (1995). Modelling relations between instrumental and sensory measurements in factorial experiments. *Food Quality and Preference*, 6(4), 239–244. doi:10.1016/0950-3293(95)00023-2
- Strigler, F., Touraille, C., Sauvageon, F., Barthelemy, J., & Issanchou, S. (1998). Les épreuves. *évaluation sensorielle : manuel méthodologique* (Lavoisier.). Depledt F. & Strigler F.
- Watson, G., Papelis, Y., & Ahmad, O. (2006). Design of Simulator Scenarios to Study Effectiveness of Electronic Stability Control Systems. *Transportation Research Record*, 1980(1), 79–86. doi:10.3141/1980-13
- Wierwille, W. ., Casali, J. ., & Repa, B. . (1983). Driver steering reaction time to abrupt-onset crosswinds, as measured in a moving-base driving simulator. *Human factors*, 25(1), 103–116.
- Williams, A. A. (1994). Flavour quality — Understanding the relationship between sensory responses and chemical stimuli. What are we trying to do? The data, approaches and problems. *Food Quality and Preference*, 5(1–2), 3–16. doi:10.1016/0950-3293(94)90003-5

CHAPITRE 5

Vers l'objectivation des prestations ESC sur simulateur

5.1 Applications à la caractérisation d'un ESC

5.1.1 Introduction

Nous avons vu dans les chapitres précédents la capacité de sujets non-experts à correctement évaluer des situations de perte d'adhérence sur simulateur (CHAPITRE 2 et CHAPITRE 3). Nous avons également développé un modèle pour prédire cette évaluation en reliant les données objectives et subjectives (CHAPITRE 4). Nous cherchons maintenant à évaluer la capacité du modèle à caractériser subjectivement l'action d'un système de correction de trajectoire (ESC) dans ces situations de perte d'adhérence.

5.1.2 Méthodes

Quatorze sujets ont conduit sur le même simulateur et circuit que la précédente expérimentation (CHAPITRE 3). Comme pour les expériences précédentes (CHAPITRE 2 et CHAPITRE 3) les pertes d'adhérence étaient simulées en modifiant le coefficient d'adhérence au sol pendant une certaine durée. Un modèle ESC générique configuré pour le modèle véhicule choisi a également été utilisé. Les sujets ont conduit huit conditions précédées d'un circuit de familiarisation au simulateur et de quatre essais de familiarisation à la tâche. Pour chaque sujet, l'ordre de passage était divisé en deux blocs identiques avec et sans la présence du système de correction de trajectoire. Les sujets n'étaient pas informés de la potentielle présence du système d'aide. Après chaque conduite les participants devaient répondre à un questionnaire afin d'évaluer trois descripteurs subjectifs selon une échelle continue non graduée. Les variables objectives liées à la dynamique du véhicule et aux actions du conducteur étaient enregistrées pendant chaque conduite.

Les données ont été triées selon les déclenchements du système ESC. Pour chaque descripteur subjectif, les modèles précédemment développés (CHAPITRE 4) ont été utilisés pour prédire les évaluations et les confronter avec les évaluations observées.

5.1.3 Résultats principaux.

Avec et sans déclenchement ESC, les meilleures prédictions sont pour le descripteur « intensité perçue ». L'ensemble des critères d'évaluation suggèrent que les prédictions sont meilleures en l'absence de déclenchement de l'ESC.

5.1.4 Discussion

Nous observons une bonne capacité prédictive du modèle pour les situations sans déclenchements. Ces résultats confirment ceux précédemment observés (Chap. 4) sur un panel de sujet différent. Cependant les écarts de prédictions montrent cette fois encore que l'utilisation d'un modèle linéaire simple n'est pas suffisante.

Les erreurs de prédictions du modèle dans les situations où l'ESC s'est déclenché sont plus importantes. Les évaluations prédites sont également moins bien corrélées avec les évaluations réelles. Le modèle tend dans ce cas-là à surestimer les évaluations et suggère un effet de l'ESC qui nécessiterait un ajustement du modèle.

Malgré la portée limitée de cette dernière expérimentation, la méthodologie utilisée semble avoir un potentiel intéressant pour évaluer et caractériser ce type de système d'aide à la conduite. D'autres expérimentations sont encore nécessaires pour améliorer la robustesse du modèle et appliquer une méthode similaire sur des nouveaux projets tel le véhicule électrique où les réactions des conducteurs ne sont pas encore bien connues.

5.2 Manuscrit expérimentation 3

Toward predicting the subjective assessment of ESC in a driving simulator

Thomas Denoual^{1,2}, Franck Mars², Jean-François Petiot², Andras Kemeny^{1,3}

1, RENAULT, Technical Center for Simulation, 1 avenue du golf – 78288 Guyancourt, France

2, LUNAM Université, CNRS, Ecole Centrale de Nantes, IRCCyN (Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes), 1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France

3, Arts et Métiers ParisTech, Institut Image, 2, rue Thomas Dumorey 71100 Chalon-sur-Saône, France

Résumé

Nos précédents travaux ont visé à développer une méthode d'évaluation pour décrire les épisodes de pertes d'adhérence au moyen d'indicateurs subjectifs et proposer un modèle prédictif pour ces évaluations subjectives. Cette étude présente l'utilisation du modèle présenté précédemment et les évaluations prédites en présence d'un ESC. Les résultats confirment les capacités du modèle et le potentiel de la méthode présentée pour évaluer et caractériser un ESC sur un simulateur de conduite en phase amont du processus de conception. Cependant, des études supplémentaires seront nécessaires pour améliorer la robustesse du modèle et son utilisation dans des situations différentes.

Abstract

Previous works have sought to develop an evaluation method to describe loss of adherence episodes by means of subjective indicators and to propose a predictive model of the subjective evaluations. This study presents the use of the presented model and predicted evaluations when ESC is triggered. The results confirm the capabilities of the model and the potential of the presented methodology to evaluate and characterize ESC on a driving simulator in the early stages of the engineering design. However further studies will be necessary to improve the robustness of the model and its use in various situations.

5.2.1 Introduction

Loss of adherence (LOA) can lead to loss of vehicle control, a major factor in many accidents. Electronic Stability Control (ESC) is an advanced driving assistance system (ADAS) that dynamically corrects the vehicle trajectory according to the driver's intentions in emergency situations. It is useful in particular in case of loss of adherence (LOA) in bends due to excessive speed or alteration of road grip, which can lead to loss of vehicle control. Using electronic stability control (ESC) can limit the consequences of these situations (Erke, 2008; Liebmenn et al., 2004). The calibration and validation processes of ESC are time consuming and require the use of physical prototypes and expert drivers at specific test sites, especially for very low-adherence situations. Consequently, driving simulators are being used to study LOA episodes and ESC performance (Papelis et al., 2010; Watson et al., 2006). Driving simulators are useful tools in vehicle design and perception studies. They allow the safe exploration of critical situations with naive drivers and without environmental bias (Kemeny, 2009). The present study is a step of a research program that is aimed at understanding how drivers perceive and react to trajectory perturbations and to the intervention of an ESC system. This could be useful for using driving simulators to develop the engineering specifications of ESC and to evaluate how actual drivers perceive different system configurations.

Previous works (Denoual et al., 2010, 2011) have sought to develop an evaluation method to describe LOA episodes by means of subjective indicators using a non-structured-scaled questionnaire (Strigler et al., 1998) and to determine to what extent objective and subjective indicators were related. In this paper, an explicative and predictive model of driver subjective assessment in LOA situations has been proposed. It is based on objective measurement of vehicle behaviour such as lateral acceleration, heading speed or slip angle (Denoual et al., 2012). The present study evaluated the influence of ESC activation on subjective ratings and the predictiveness of the model for ESC triggering cases in LOA situations.

An experiment was conducted on the high fidelity dynamic ULTIMATE simulator using the SCANeR®Studio software package with a real-time version of the MADA (Advanced Modeling of Vehicle Dynamic) vehicle dynamic software, developed by RENAULT. The intensity (0.1 to 0.3 adherence coefficient) and duration (250ms to 750ms) of the simulated LOA in the bend were manipulated as independent variables on the four wheels. Situations of LOA inducing a significant modification on the vehicle without involving a brutal road departure were chosen. ESC availability (on or off) was

the third independent variable. All subjects experienced the same LOA situations with and without ESC assistance. They were not aware of the presence of the assistance.

The objective of the study is to evaluate the accuracy of the developed model on a new data set, with and without the presence of an ESC system. The first results show a good accuracy of the predictive model on the data set without ESC. ESC triggering seems to slightly perturb the model prediction. Although further experiment will be necessary to improve the robustness of the model and enlarge to various applications, the methodology proposed seems to have a strong potential to evaluate ESC strategy in the early steps of engineering design.

5.2.2 Method

Participants

Four female and ten male drivers between 27 and 59 years old (mean age of 43.6) participated in the experiment. They had held a driving license for 20.6 years on average and drove between 1000 and 20000 km per year (mean = 13400). All of them had normal or corrected-to-normal vision.

Apparatus

The experiment was conducted on the high-performance dynamic Ultimate simulator (Dagdelen et al., 2006) at Renault Technical Center for Simulation (Figure 5.1). It consists of a compact size passenger car based on a real Laguna interior design. The cab is mounted on a large X-Y table and a hexapod motion system to render physical accelerations and rotations. Transmission is carried out using a manual gearbox. A system of sound synthesis is used to reproduce engine noise and the audio environment for an interactive vehicle. Active steering force feedback is computed by a proprietary model and reproduced by a TRW electric power steering system.

The SCANeR© Studio software package was used with a real-time version of the MADA (Advanced Modeling of Vehicle Dynamic) vehicle dynamic software, developed by RENAULT. The visual environment was displayed on a cylindrical screen (radius 1.9 m) by three single-chip DLP projectors, each with a resolution of 1024 x 768. The system covers a visual angle of 150°.



Figure 5.1. Ultimate Renault driving simulator

The graphics database reproduced an open countryside driving environment (Figure 5.3). Behavioural measures (lateral position, steering angle, lateral acceleration, etc.) were recorded during the trials at 20 Hz. All trials were performed on a short section of the driving environment, which comprised a straight line followed by a bend (total distance: 700 m; mean radius in the bend: 111 m) without traffic (Figure 5.2).

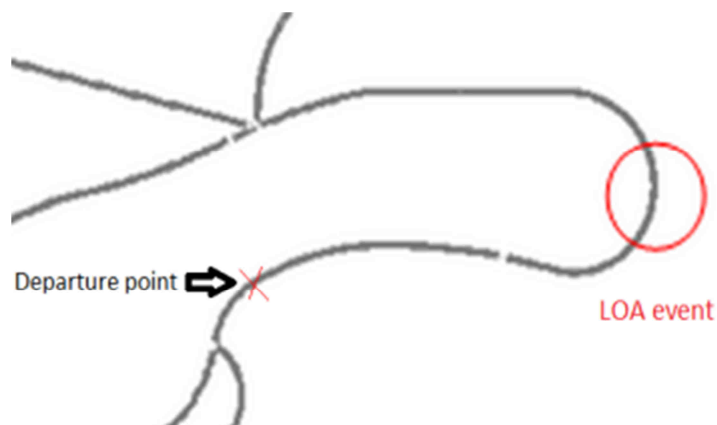


Figure 5.2. Layout of the country track



Figure 5.3. Visual environment in the bend

A software-in-the-loop generic ESC system was used (Figure 5.4). The system was set up with the characteristics of the simulated vehicle, but the tuning did not reflect the supplier tuning mounted on the real car. The complex proprietary control laws to handle the vehicle stability will not be detailed.

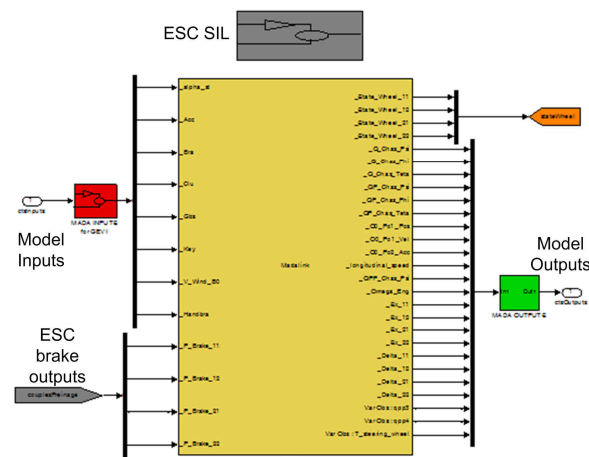


Figure 5.4. ESC software model integrated in the MADA vehicle dynamics model

Procedure

LOA was simulated by modifying the adherence under the wheels when the vehicle reached a defined point in the bend. The intensity (adherence coefficient) and duration of the simulated LOA in the bend were manipulated as independent variables (IV). An adherence coefficient decrease corresponds to an increase in the intensity of LOA. ESC availability (on or off) was the third independent variable. These values of intensity and duration were chosen to induce perceptible but controllable LOA simulated

on four wheels (Table 5.1). The LOA situation induced a skid towards the outside of the bend. The environment did not give clues about a potential LOA (such as snow, rain or a mark on the road). Subjects faced each of the four conditions two times, with and without ESC. A Williams Latin Squares design (Williams, 1949) was adopted to control rank and carry-over effects. After each experimental condition, the subject was asked to assess the LOA on a continuous unstructured scale according to 3 descriptors: perceived intensity, control feeling, danger.

Participants were asked to keep to their lane without cutting the corner, even if there was no oncoming traffic. After a 10-minute practice session, they drove around the test bend at a predefined speed (75 km/h). Subjects received verbal assistance from the person conducting the experiment in order to maintain a constant speed and stay focused on steering control. Four trials without any LOA were performed in order to allow the subjects to familiarize themselves with the task.

Conditions	C1	C2	C3	C4
Adherence coefficient	0.1	0.1	0.3	0.3
Duration (ms)	250	750	250	750

Table 5.1: LOA conditions

Data Analysis

Data were sorted out to identify situations where ESC has actually triggered. Predictive subjective responses were computed with a perception evaluation model of LOA situations that was developed previously by (Denoual et al., 2012). The models for each subjective descriptor (Y_j) are reminded below (Equation 5.1, 5.2 & 5.3). Actual subjective responses Y_j were then compared with the values of the model \hat{Y}_j in order to assess its accuracy as a function of ESC activation.

$$\text{Perceived intensity} = -17.90 + 6.62 \text{ lateral acceleration} + 3.57 \text{ heading speed} \quad \text{Equation 5.1}$$

$$\text{Control feeling} = 26.64 - 0.86 \text{ sleep angle} - 6.90 \text{ heading speed} \quad \text{Equation 5.2}$$

$$\text{Danger} = -13.57 + 4.71 \text{ lateral acceleration} + 2.50 \text{ steering wheel angle} \quad \text{Equation 5.3}$$

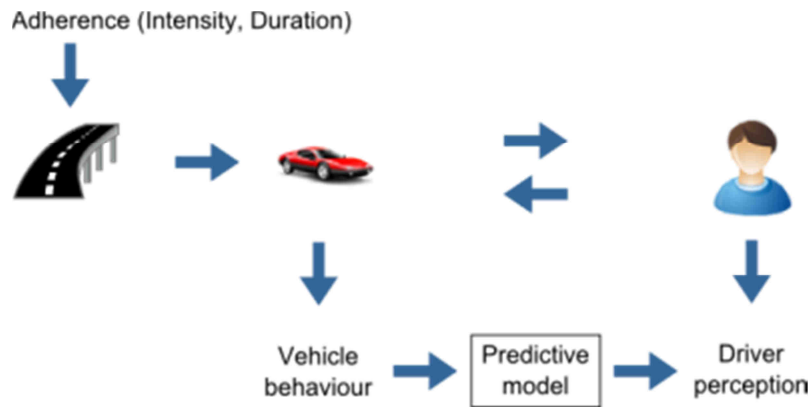


Figure 5.5. Input and Output data

Two indicators were used to evaluate the predictions errors:

- The mean absolute error (MAE). It represents the forecast accuracy of the model (equation 4): the smaller the *MAE*, the better the forecast accuracy.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\hat{Y}_{kj} - Y_{kj}| \quad \text{Equation 5.4}$$

- The root mean square error (RMSE)

In order to evaluate the quality of the predictions, we also computed the Pearson coefficient correlation (*r*) between the predicted values \hat{Y}_j by the models and the actual observed values Y_j .

5.2.3 Results

The followings tables give the results of the MAE, the RMSE and the correlation coefficients between predicted and actual values for each descriptor, without (Table 5.2) and with ESC triggering (Table 5.3).

Y_j	RMSE	MAE	<i>r</i>
Intensity	1.08	0.90	0.81
perceived			
Control	1.9	1.61	0.65
feeling			
Danger	1.47	1.19	0.65

Table 5.2: RMSE, MAE and correlation coefficients for model forecast without ESC triggering

	RMSE	MAE	r
Intensity	1.39	1.07	0.60
perceived			
Control	2.39	1.64	0.52
feeling			
Danger	1.58	1.24	0.60

Table 5.3: RMSE, MAE and correlation coefficients for model forecast with ESC triggering

Figure 5.6 represents the correlation between observed and predicted scores for subjective indicators with and without ESC activation for the data sample

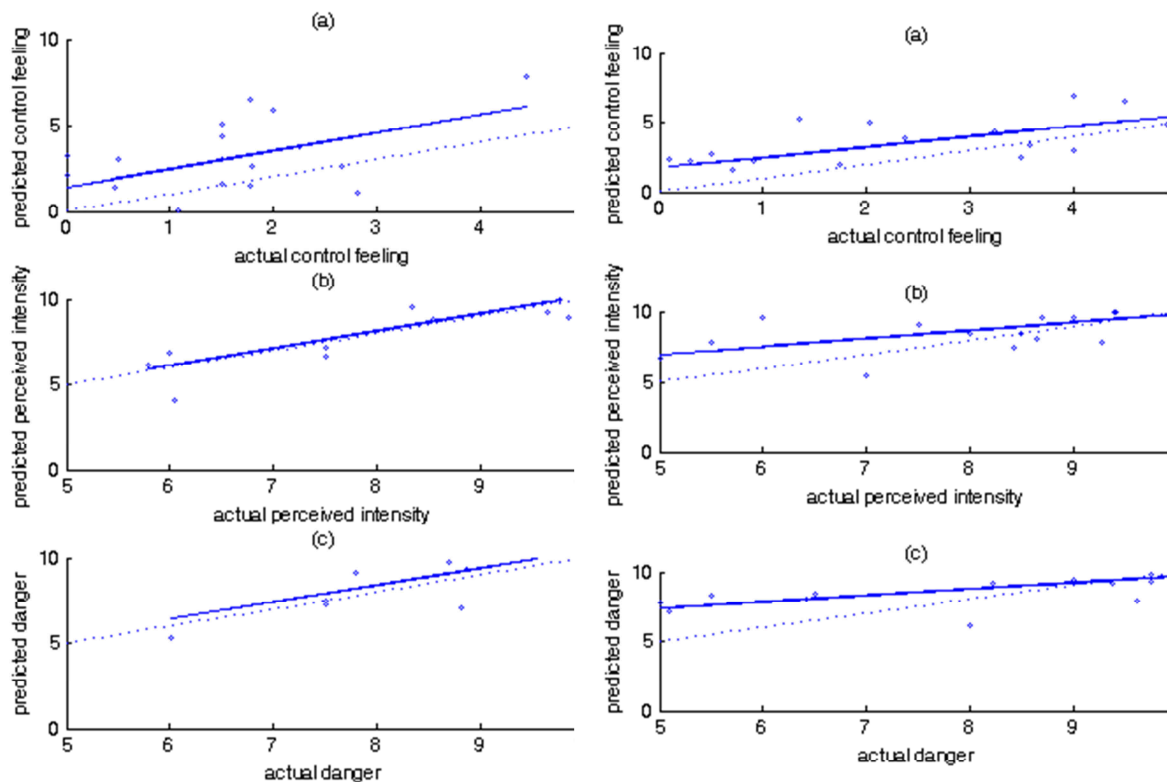


Figure 5.6. Correlation between actual and predicted scores for control feeling, perceived intensity and danger (n=18) without ESC triggering (left a,b,c) and with ESC triggering (right a,b,c). Solid line: actual correlation, dotted line: perfect correlation (

Fisher's tests perform on the subjective variables show no significant effect of ESC triggering on "Danger" ($F=1.209$, $p=0.28$), "intensity perceived" ($F=0.47$, $p=0.50$), and "control of feeling" ($F=1.58$, $p=0.22$)

Fisher's tests perform on the objective variables show no significant effect of ESC triggering on maximum lateral acceleration ($F=0.42$, $p=0.52$), maximum steering wheel angle ($F=2.12$, $p=0.15$), maximum heading speed ($F=0.32$, $p=0.58$) and maximum slip angle ($F=0.02$, $p=0.88$).

5.2.4 Discussion

The present study shows the use of multiple linear models to predict driver subjective assessment in LOA situations with and without ESC triggering. For the data set without ESC, we observed good predictions of the models in the same range as seen as previously (Denoual et al., 2012). This confirms the capabilities of the model with a different panel of participants, which validates the methodology we used.

The same model was applied to characterize different situations in which ESC triggered. Results show that the prediction errors were more important with ESC activated. In this case, the predictive evaluations were also less correlated with the actual subjective evaluations. This probably means that the model parameters need adjustments to fit with the action of ESC. The correlation plots seem to show that the model overestimated the subjective evaluations compared to the observations. Unfortunately, results do not show a significant effect of ESC on subjective evaluation. This could be explained by the tuning of our ESC that provided limited trajectory corrections. Further investigations will be made on this question with different tuning of ESC and different LOA situations.

A traditional problematic with subjective evaluation on simulator is the simulation rendering fidelity compared to real perception. In our case, for obvious safety reasons, it would be difficult to reproduce the same experiment on a real track with non-expert drivers and compare the results. However, the global fidelity of a simulator can be estimated indirectly. On the Ultimate simulator, subjective evaluation campaign has been performed by Renault expert drivers. They have notably rated steering wheel, heading and pitch as “Satisfying” for a 0.2Hz / 0.2G slalom manoeuvres on Laguna simulation (Dagdelen, 2007). We can also identify and compensate for the simulator motion cueing delays (Fang et al., 2010) and adjust scale factor for lateral and yaw motion rendering (Filliard et al., 2009). Moreover, the fidelity of the simulator has been evaluated within the framework of the Eureka Moves European Project (Berthoz et al., 2011). Thus, we are confident on the level of fidelity of Ultimate for this application.

This study shows the strong potential of this methodology to evaluate and characterized ESC with the help of a driving simulator, in particular in the early stage of the development process when no physical prototypes are available. It also adds the possibility to evaluate ESC system from a non-expert point of view, which may complement traditional methods. However, further studies are necessary to improve the quality and robustness of the model. A similar method could be applied on new projects like electrical vehicle (Fang et al., 2011) for which drivers’ reactions are not well known.

5.2.5 Conclusions

A model presented in this paper allows predicting subjective evaluations of loss of adherence in driving simulator experiments. Further studies will allow improving the robustness of the model and its application in various situations. This study shows the strong potential of this methodology to evaluate and characterized ESC on a driving simulator in the early stages of the engineering design.

5.2.6 References

- Berthoz, A., Bles, W., Bühlhoff, H. ., Correia Gracio, B. J., Feenstra, P., Filliard, N., Huhne, R., Kemeny, A., Mayrhofer, M., Mulder, M., Nusseck, H. ., Pretto, P., Reymond, G., Schlüsselberger, R., Schwandtner, J., Teufel, H., Vailleau, B., van Passen, M. M., Vidal, M., & Wentik, M. (2011). High-performance motion cueing for driving simulators. *IEEE Transactions on Systems, Man and cybernetics - Part A: Systems and Humans*, Submitted.
- Dagdelen, M. (2007). *Comportement dynamique du simulateur de conduite ULTIMATE* (Internal technical Note). Renault.
- Dagdelen, M., Berlioux, J. C., Panerai, F., Reymond, G., & Kemeny, A. (2006). Validation process of the ULTIMATE high-performance driving simulator. *Proceedings of DSC Europe* (pp. 37–48). Paris.
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., & Kemeny, A. (2012). Predicting the subjective evaluation of vehicle behaviour in a driving simulator (Vol. in press). Presented at the Engineering Systems Design and Analysis conference, Nantes, France.
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., Reymond, G., & Kemeny, A. (2010). Drivers' perception of simulated loss of adherence in bends. In Andras Kemeny, F. Merienne, & S. Espié (Eds.), *Trends in driving simulation design and experiments* (pp. 43–53). Paris. Retrieved from <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00539685>
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., Reymond, G., & Kemeny, A. (2011). Drivers' Perception of Loss of Adherence in Bends: Influence of Motion Rendering. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11(4), 041004. doi:10.1115/1.3622752
- Erke, A. (2008). Effects of electronic stability control (ESC) on accidents: A review of empirical evidence. *Accident Analysis & Prevention*, 40(1), 167–173. doi:10.1016/j.aap.2007.05.002
- Fang, Z., Alirand, M., André, S., Denoual, T., Kemeny, A., Reymond, G., & Jansson, A. (2011). Multi objective analyses on a driving simulator applied to an electric vehicle: vehicle stability, handling and drivability. Presented at the SIA Congress on Vehicle Dynamics, Mulhouse, France.

- Fang, Z., Reymond, G., & Kemeny, A. (2010). Performance identification and compensation of simulator motion cueing delays. In Andras Kemeny, F. Merienne, & S. Espié (Eds.), *Trends in driving simulation design and experiments* (pp. 111–120). Paris.
- Filliard, N., Vailleau, B., Reymond, G., & Kemeny, A. (2009.). Combined scale factors for lateral and yaw motion rendering. *Proceedings of DSC Europe Conference* (pp. 161–172). Monte-Carlo.
- Kemeny, A. (2009). Driving simulation for virtual testing and perception studies (pp. 15–23). Presented at the Driving Simulation Conference Europe.
- Liebemann, E. K., Meder, K., Schuh, J., & Nenninger, G. (2004). Safety and Performance Enhancement: The Bosch Electronic Stability Control (ESP). SAE, (2004-21-0060).
- Papelis, Y. ., Watson, G. ., & Brown, T. (2010). An empirical study of the effectiveness of electronic stability control system in reducing loss of vehicle control. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 929–934. doi:10.1016/j.aap.2009.04.018
- Strigler, F., Touraille, C., Sauvageon, F., Barthelemy, J., & Issanchou, S. (1998). Les épreuves. *Évaluation sensorielle : manuel méthodologique* (Lavoisier.). Depledt F. & Strigler F.
- Watson, G., Papelis, Y., & Ahmad, O. (2006). Design of Simulator Scenarios to Study Effectiveness of Electronic Stability Control Systems. *Transportation Research Record*, 1980(1), 79–86. doi:10.3141/1980-13
- Williams, E. (1949). Experimental Designs Balanced for the Estimation of Residual Effects of Treatments. *Australian Journal of Chemistry*, 2(2), 149. doi:10.1071/CH9490149

CHAPITRE 6

Conclusion générale

6.1 Synthèse des résultats

Les travaux présentés dans ce manuscrit avaient pour objectif de proposer une méthodologie, adaptée à l'usage des simulateurs, pour évaluer subjectivement des prestations de conduite. Plus particulièrement, le cas des pertes d'adhérence en virage a été analysé, afin de répondre aux problématiques industrielles liées au développement de système type ESC, par rapport aux questions principales suivantes :

- Quelle(s) méthodes utiliser pour évaluer subjectivement une prestation de conduite sur simulateur ?
- Quels sont les indices sensoriels mis en jeu ?
- Comment relier les jugements subjectifs aux données objectives ?

Une étude exploratoire a été menée sur le simulateur statique du laboratoire IRCCyN afin de valider une méthodologie d'évaluation des pertes d'adhérences sur simulateur. Une série de perturbations, modulée en fonction de l'intensité et de la durée des pertes d'adhérence a été simulée. L'évaluation subjective était recueillie au moyen d'un questionnaire, composé d'échelles de cotation linéaires pour chacun des descripteurs. Les résultats ont permis de montrer la capacité de sujets non-experts à discriminer et à classer correctement les différentes situations. Nous avons pu observer que l'intensité des pertes d'adhérence était correctement perçue et évaluée contrairement à leur durée dont la perception était plus imprécise. Nous avons également montré que les sujets étaient capables de bien différencier l'évaluation de la perturbation et ses conséquences sur la modification de la trajectoire. Nous avons pu noter que d'un point de vue sensoriel, les informations provenant du volant semblaient être les plus importantes pour détecter la perturbation. Les informations visuelles n'intervenant que pour les perturbations les plus fortes.

Une seconde expérimentation a été menée sur le simulateur dynamique ULTIMATE (CTS - Renault) afin d'étudier l'influence de la restitution des informations inertielles sur l'évaluation des perceptions. L'expérience précédente a ainsi été reproduite. Nous avons confirmé la capacité de sujets non-experts à discriminer et à classer correctement les différentes perturbations. L'ajout des informations inertielles semble avoir amélioré légèrement la perception de la durée des perturbations. Cette expérience a surtout permis de mettre en évidence l'importance primordiale des informations inertielles dans la détection des perturbations de trajectoire. Nous avons également pu constater un renforcement de la détection visuelle de ces perturbations, ce

qui reflète probablement les interactions visuo-vestibulaires qui entrent en jeu dans la perception du mouvement propre.

Les données fournies par ces deux expérimentations nous ont permis de mettre en place un modèle de prédiction des évaluations subjectives. Nous avons utilisé des modèles de régression linéaire multiple basés sur des relations psychophysiques connues (Loi de Weber-Fechner) pour évaluer la relation entre les données issues de la dynamique du véhicule et les jugements des sujets. Une méthode de sélection de modèle basée sur le critère AIC nous a permis d'identifier les variables objectives qui influencent le plus la variation de chaque descripteur subjectif. La qualité des prédictions a été testée sur un échantillon de données et nous montre que les modèles utilisés ont de meilleurs résultats pour les descripteurs « Maîtrise du véhicule » et « Intensité perçue ». La restitution des informations inertielles semble avoir une influence positive importante sur la capacité prédictive des modèles pour l'« Intensité perçue ».

Un dernier chapitre expérimental a servi de cadre applicatif industriel à ces travaux. La capacité des modèles précédemment développés pour prédire l'évaluation des perceptions du déclenchement d'un système de correction de trajectoire (ESC) a ainsi été testée sur le simulateur dynamique ULTIMATE. Une procédure et des situations expérimentales similaires aux deux premières expériences ont été mises en place. Les résultats montrent une influence du déclenchement du système sur les capacités prédictives des modèles. Cette expérience a ainsi permis de proposer une première caractérisation subjective du déclenchement d'un ESC sur simulateur de conduite. Cependant, cette expérience préliminaire devra être complétée afin de conforter et améliorer la validité des modèles.

6.2 Perspectives

Les résultats présentés dans nos travaux constituent une première approche dans la mise en place de méthodologies d'usage adaptées aux spécificités des simulateurs de conduite et de l'évaluation subjective en situation de conduite. Plus particulièrement, les simulateurs de conduite semblent être des outils prometteurs pour évaluer des perturbations de trajectoire et les systèmes d'assistance associés, par des sujets non-experts, pendant les processus amont de conception. Des campagnes d'essais plus vastes devraient permettre d'améliorer la pertinence des descripteurs à utiliser, et rendre plus robustes les modèles de relation objectif/subjectif proposés.

Cependant, l'utilisation des simulateurs dans les processus de conception pour caractériser des prestations dynamiques de conduite soulève encore certaines questions.

Contribution des conducteurs non-experts

Dans ces travaux, nous avons pu apprécier la capacité de sujets non-experts à discriminer et correctement identifier les situations auxquelles ils étaient confrontés. Il faudrait comparer ces observations avec les réponses de conducteurs experts. Les résultats nous permettraient, d'une part, d'identifier les limites perceptives des conducteurs non-experts. D'autre part, l'identification de différences comportementales en réponse aux modifications de trajectoire pourrait donner des informations utiles pour ajuster les paramétrages des systèmes d'aide.

D'un point de vue subjectif, l'utilisation de conducteurs non-experts nécessite le choix d'un vocabulaire adapté et compréhensible par tous. Dans nos travaux, nous avons pu proposer une première caractérisation subjective de situations de perte d'adhérence et le réglage d'un système de correction de trajectoire. D'autres études seront nécessaires pour augmenter le nombre de descripteurs et ainsi proposer des caractérisations plus complètes. Le concours de conducteurs experts serait un atout pour développer un corpus plus conséquent et faire le lien avec le vocabulaire technique habituellement utilisé pour décrire le comportement dynamique du véhicule. Là encore, une comparaison des résultats de caractérisation par ces deux catégories de conducteurs pourrait permettre d'améliorer la mise au point des systèmes d'aide.

Le développement et la mise au point des systèmes d'aide au contrôle de la trajectoire se fait majoritairement par des conducteurs experts sur des pistes d'essais. On peut aisément comprendre que pour des raisons de sécurité, de confidentialité et de coût, la mise en place d'essais avec des conducteurs non-experts est difficile. Nos travaux confirment l'utilité des simulateurs de conduite pour répondre à ce type de problématique.

Validité de la simulation

L'utilisation de simulateurs de conduite dits dynamiques repose sur des architectures mécaniques complexes capables de reproduire les mouvements d'un véhicule. Dans le cas du simulateur ULTIMATE, il s'agit d'une plateforme (hexapode) et de rails. Les limites mécaniques de la plateforme et du rail ne permettent de pas de

restituer tous les niveaux d'accélération qu'ils soient ponctuels, pour des amplitudes d'accélération fortes, ou continu pour des accélérations soutenues.

L'atteinte des limites d'adhérence d'un véhicule sur route sèche nécessite la capacité à restituer des accélérations très forte (pouvant atteindre les $10 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$) difficile à reproduire fidèlement par les systèmes actuels. Il est donc préférable de privilégier des situations correspondant à des conditions d'adhérence plus faible (route mouillée, enneigée ou verglacée) qui nécessite d'atteindre des accélérations moins fortes.

Par ailleurs, la validation des systèmes de correction de trajectoire dans des conditions d'adhérence réduite se trouve généralement sur des jalons critiques dans le processus de conception du véhicule et représente des contraintes d'essai fortes. Le développement de méthodologies capables de caractériser les prestations d'un ESC sur simulateur de conduite représente donc un enjeu industriel important. Nos travaux ont permis de développer une méthode d'évaluation sur simulateur de conduite dont les premiers résultats semblent prometteurs. Cependant, beaucoup de travaux seront encore nécessaires pour prétendre remplacer définitivement les essais sur piste.

En effet, il serait notamment intéressant de comparer les caractérisations subjectives obtenues sur le simulateur avec des essais sur véhicules réels pour estimer un niveau de validité du simulateur pour ces situations et ajuster les paramètres de la simulation.

Aspects cognitifs

Une autre partie de nos travaux nous a amené à nous intéresser à la contribution des indices sensoriels dans la détection des situations de perte d'adhérence en virage. Les modèles et connaissances actuels admettent la prédominance de la modalité visuelle avec un apport important des informations inertielles dans le cas de la conduite en virage. Cependant ces modèles ne sont valables qu'en situation nominale de conduite où les écarts de trajectoire sont faibles et principalement corrigés de façon inconsciente par des boucles de régulation sensorimotrices.

Les situations de perte d'adhérence en virage entraîne des déviations beaucoup plus importantes de trajectoire et nécessite une action correctrice consciente pour maintenir la trajectoire du véhicule. Les résultats de nos travaux montrent que la détection de ces perturbations repose principalement sur les informations non-visuelles. En l'absence de restitution inertielle, les informations provenant du volant sont prépondérantes. Les informations inertielles semblent prendre le pas lorsqu'elles sont restituées. Un phénomène de sélection sensorielle semble apparaître, les conducteurs

se focalisant sur l'information la plus saillante pour détecter ces situations. Cependant, ces résultats ont été obtenus en comparant les données provenant de deux simulateurs différents. D'autres essais devront être menés sur un même simulateur afin de préciser ces différences et enlever le biais potentiel du changement d'environnement de simulation.

En conclusion, une telle approche offre de nouveaux outils pour améliorer la conception des systèmes d'aides liés au contrôle de la trajectoire, et plus généralement aux prestations dynamiques du véhicule. Elle offre, en outre, un moyen nouveau pour associer aux aspects purement sécuritaires, la prise en compte des comportements des conducteurs dans la mise au point de ces systèmes.

Bibliographie

- Ash, H. A. (2002). *Correlation of Subjective and Objective Handling of Vehicle Behaviour* (Thèse). The University of Leeds - School of Mechanical Engineering.
- Authié, C. N., & Mestre, D. R. (2012). Path Curvature Discrimination: Dependence on Gaze Direction and Optical Flow Speed. (D. Wylie, Ed.) *PLoS ONE*, 7(2), e31479. doi:10.1371/journal.pone.0031479
- Berthoz, A., Bles, W., Bühlhoff, H. ., Correia Gracio, B. J., Feenstra, P., Filliard, N., Huhne, R., Kemeny, A., Mayrhofer, M., Mulder, M., Nusseck, H. ., Pretto, P., Reymond, G., Schlüsselberger, R., Schwandtner, J., Teufel, H., Vailleau, B., van Passen, M. M., Vidal, M., & Wentik, M. (2011). High-performance motion cueing for driving simulators. *IEEE Transactions on Systems, Man and cybernetics - Part A: Systems and Humans*, Submitted.
- Boer, E. ., Yamamura, T., Kuge, N., & Girshick, A. (2000). Experiencing the same road twice : a driver comparison between simulation and reality. *Proceedings of Driving Simulator Conference* (pp. 33–55). Paris, France.
- Chen, D. (1997). *Subjective And Objective Vehicle Handling Behaviour* (Thèse). The University of Leeds - School of Mechanical Engineering.
- Cliff, M. ., Dever, M. ., Hall, J. ., & Girard, B. (1995). Development and evaluation of multiple regression models for prediction of sweet cherry liking. *Food Research International*, 28(6), 583–589. doi:10.1016/0963-9969(95)00041-0
- Correia Gracio, B. J., Wentik, M., Feenstra, P., Mulder, M., van Passen, M. M., & Bles, W. (2009). Motion Feedback in Advanced Driving Manoeuvres. *Proceedings of DSC Europe* (pp. 145–160). Monaco.
- Dagdelen, M. (2005). *Restitution des stimuli inertiels en simulation de conduite* (Thèse). École des Mines de Paris.
- Dagdelen, M. (2007). *Comportement dynamique du simulateur de conduite ULTIMATE* (Internal technical Note). Renault.
- Dagdelen, M., Berlioux, J. C., Panerai, F., Reymond, G., & Kemeny, A. (2006). Validation process of the ULTIMATE high-performance driving simulator. *Proceedings of DSC Europe* (pp. 37–48). Paris.
- Dairou, V., Priez, A., Sieffermann, J.-M., & Danzart, M. (2003). *An Original Method to Predict Brake Feel: A Combination of Design of Experiments and Sensory Science* (No. 2003-01-0598). Warrendale, PA: SAE International. Retrieved from <http://www.sae.org/technical/papers/2003-01-0598>

- Dang, J. . . (2007). *Statistical analysis of the effectiveness of electronic stability control (ESC) systems – final report* (No. DOT HS-810-794). Washington D.C.: NHTSA.
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., & Kemeny, A. (2012). Predicting the subjective evaluation of vehicle behaviour in a driving simulator (Vol. in press). Presented at the Engineering Systems Design and Analysis conference, Nantes, France.
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., Reymond, G., & Kemeny, A. (2010). Drivers' perception of simulated loss of adherence in bends. In Andras Kemeny, F. Merienne, & S. Espié (Eds.), *Trends in driving simulation design and experiments* (pp. 43–53). Paris. Retrieved from <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00539685>
- Denoual, T., Mars, F., Petiot, J.-F., Reymond, G., & Kemeny, A. (2011). Drivers' Perception of Loss of Adherence in Bends: Influence of Motion Rendering. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11(4), 041004. doi:10.1115/1.3622752
- Donges, E. (1978). A two-level model of driver steering behavior. *Human Factors*, 20(6), 691–707.
- Dubart, D., Kassaagi, M., Moessinger, M., & Lefort, M. (2007). ADAS design method based on real world driving. Presented at the ESV, Lyon, France: NHTSA.
- Dubart, D., Kassaagi, M., Popieul, J.-C., Moessinger, M., & Lefort, M. (2008). Methodology to Improve ADAS Specification Using Normal Driving Data. Presented at the FISITA, Munich, Allemagne.
- Durisek, N. ., & Granat, K. . . (2008). *Industry Implementation of Automotive Electronic Stability Control (ESC) Systems* (No. 2008-01-0593). Warrendale, PA: SAE International. Retrieved from <http://www.sae.org/technical/papers/2008-01-0593>
- Elloumi, H. (2006). *Commande des plates-formes avancées de simulation de conduite* (Thèse). Ecole des Mines de Paris.
- Erke, A. (2008). Effects of electronic stability control (ESC) on accidents: A review of empirical evidence. *Accident Analysis & Prevention*, 40(1), 167–173. doi:10.1016/j.aap.2007.05.002
- Essma, S. (2000). Steering Effort Analysis of an Oval Racing Track Setup Champ Car. Presented at the International ADAMS User Conference, Orlando, Florida.
- Fang, Z., Alirand, M., André, S., Denoual, T., Kemeny, A., Reymond, G., & Jansson, A. (2011). Multi objective analyses on a driving simulator applied to an electric vehicle: vehicle stability, handling and drivability. Presented at the SIA Congress on Vehicle Dynamics, Mulhouse, France.
- Fang, Z., Reymond, G., & Kemeny, A. (2010). Performance identification and compensation of simulator motion cueing delays. In Andras Kemeny, F. Merienne, & S. Espié (Eds.), *Trends in driving simulation design and experiments* (pp. 111–120). Paris.

- Fechner, G. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig.
- Filliard, N. (2009). *Cohérence des stimuli visuels et vestibulaires sur simulateur de conduite et en réalité virtuelle* (Thèse). Université Pierre et Marie Curie.
- Filliard, N., Vaillau, B., Reymond, G., & Kemeny, A. (2009). Combined scale factors for lateral and yaw motion rendering. *Proceedings of DSC Europe Conference* (pp. 161–172). Monte-Carlo.
- Frey, C. ., & Patil, S. (2002). Identification and Review of Sensitivity Analysis Methods. *Risk Analysis*, 22(3), 553–578. doi:10.1111/0272-4332.00039
- Giboreau, A., Navarro, S., Faye, P., & Dumortier, J. (2001). Sensory evaluation of automotive fabrics. *Food Quality and Preference*, 12(5-7), 311–322. doi:10.1016/S0950-3293(01)00016-7
- Gillepsie, T. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.
- Godthelp, H., Milgram, P., & Blaauw, G. (1984). The development of a time-related measure to describe driving strategy. *Human Factors*, 26(3), 257–268.
- Green, P. ., & Woodrooffe, J. (2006). The estimated reduction in the odds of loss-of-control type crashes for sport utility vehicles equipped with electronic stability control. *Journal of safety research*, 37(5), 493–499. doi:10.1016/j.jsr.2006.08.006
- Hancock, P. A., & Weaver, J. L. (2005). On time distortion under stress. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 6(2), 193–211. doi:10.1080/14639220512331325747
- Hoc, J. M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1(1), 22–55. doi:10.1177/155534340700100102
- Hollnagel, E. (2004). A function-centred approach to joint driver-vehicle system design (Vol. 3, pp. 2548–2551). IEEE. doi:10.1109/ICSMC.2004.1400713
- Horswill, M. S., & McKenna, F. P. (1999). The development, validation, and application of a video-based technique for measuring an everyday risk-taking behavior: drivers' speed choice. *The Journal of applied psychology*, 84(6), 977–985.
- Jurkovich, G. J., Campbell, D., Padrta, J., & Luterman, A. (1987). Paramedic perception of elapsed field time. *The Journal of Trauma*, 27(8), 892–897.
- Kemeny, A. (2009). Driving simulation for virtual testing and perception studies (pp. 15–23). Presented at the Driving Simulation Conference Europe.
- Kemeny, A, & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), 31–37. doi:10.1016/S1364-6613(02)00011-6

- Land, M. F., & Lee, D. N. (1994). Where we look when we steer. *Nature*, 369(6483), 742–744. doi:10.1038/369742a0
- Lappe, M., Bremmer, F., & van den Berg, A. (1999). Perception of self-motion from visual flow. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(9), 329–336. doi:10.1016/S1364-6613(99)01364-9
- Lechner, D., Delanne, Y., Schaeffer, G., & Schmitt, V. (1997). *Méthodologie de validation du logiciel de dynamique automobile CALLAS: Dynamique du véhicule automobile et ferroviaire*. Ingénieurs de l'automobile. Garches, FRANCE: VB.
- Lefebvre, T. (2007). *Simulation d'éclairage réaliste de matériaux hétérogènes en temps réel* (Thèse). Université de Marne-la-Vallée.
- Lie, A., Tingvall, C., Krafft, M., & Kullgren, A. (2006). The effectiveness of electronic stability control (ESC) in reducing real life crashes and injuries. *Traffic injury prevention*, 7(1), 38–43. doi:10.1080/15389580500346838
- Liebmann, E. K., Meder, K., Schuh, J., & Nenninger, G. (2004). Safety and Performance Enhancement: The Bosch Electronic Stability Control (ESP). SAE, (2004-21-0060).
- Malaterre, G., & Fréchaux, J. (2001). Etude de la validité des simulateurs de conduite par comparaison de tâches réalisées en situation réelle et en simulation. *Actes INRETS*, 82, 149–156.
- Mars, F. (2008). Driving around bends with manipulated eye-steering coordination. *Journal of Vision*, 8(11). doi:10.1167/8.11.10
- Mas, A. (2012). *Utilisation des simulateurs de conduite pour les études de sécurité* (Thèse). Art et Métiers ParisTech.
- Mas, A., Merienne, F., & Kemeny, A. (2011). Lateral control assistance and driver behavior in emergency situations. *Advances in transportation Studies RSS2011 Special Issues*, 149–158.
- Matsushita, A., Takanami, K., Takeda, N., & Takahashi, M. (1980). *Subjective Evaluation and Vehicle Behavior in Lane-Change Maneuvers* (No. 800845). Warrendale, PA: SAE International. Retrieved from <http://www.sae.org/technical/papers/800845>
- Mazzuchetti, G., Demichelis, R., Songia, M. B., & Rombaldoni, F. (2008). Objective Measurement of Tactile Sensitivity Related to a Feeling of Softness and Warmth. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, 16(4), 67–71.
- McLane, R. ., & Wierwille, W. W. (1975). The influence of motion and audio cues on driver performance in an automobile Simulator. *Human Factors*, 20(6), 709–716.
- Mellert, V., Baumann, I., Freese, N., & Weber, R. (2008). Impact of sound and vibration on health, travel comfort and performance of flight attendants and pilots. *Aerospace Science and Technology*, 12(1), 18–25. doi:10.1016/j.ast.2007.10.009

- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? *Plenu Press*, pp. 485–520. New-York.
- Navarro, J. (2008). *Coopération homme-machine en conduite automobile assistée : Contrôle cognitif et contrôle de la trajectoire* (Thèse). Université de Nantes.
- Néboit, M. (1974). Perception, anticipation et conduite automobile. *Le Travail Humain*, 37, 53–72.
- Newberry, A. C., Griffin, M. J., & Dowson, M. (2007). Driver perception of steering feel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 221(4), 405–415. doi:10.1243/09544070JAUTO415
- Page, Y., & Cuny, S. (2006). Is electronic stability program effective on French roads? *Accident; analysis and prevention*, 38(2), 357–364. doi:10.1016/j.aap.2005.10.006
- Papelis, Y. (2006). *Determining Loss of Control as a Means of Assessing ESC Effectiveness in Simulator Experiments* (No. 2006-01-1020). Warrendale, PA: SAE International. Retrieved from <http://www.sae.org/technical/papers/2006-01-1020>
- Papelis, Y. ., Watson, G. ., & Brown, T. (2010). An empirical study of the effectiveness of electronic stability control system in reducing loss of vehicle control. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 929–934. doi:10.1016/j.aap.2009.04.018
- Petiot, J.-F., & Yannou, B. (2004). Measuring consumer perceptions for a better comprehension, specification and assessment of product semantics. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 33(6), 507–525. doi:10.1016/j.ergon.2003.12.004
- Reimpell, J., Stoll, H., & Betzler, J. (2001). *The Automotive Chassis : Engineering Principles*. Troy, MI: The Society of Automotive Engineers.
- Reuchlin, M. (1985). *Psychologie* (PUF.). Paris.
- Reymond, G. (2000). *Contribution respective des stimuli visuels, vestibulaires et proprioceptifs dans la perception du mouvement des conducteurs* (Thèse). Université Paris VI.
- Reymond, G., Droulez, J., & Kemeny, A. (2002). Visuo-vestibular perception of self-motion modeled as a dynamic optimization process. *Biological Cybernetics*, 87(4), 301–314. doi:10.1007/s00422-002-0357-7
- Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., & Berthoz, A. (2001). Role of Lateral Acceleration in Curve Driving: Driver Model and Experiments on a Real Vehicle and a Driving Simulator. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 43(3), 483–495. doi:10.1518/001872001775898188
- Rossi, G. ., & Berglund, B. (2011). Measurement involving human perception and interpretation. *Measurement*, 44(5), 815–822. doi:10.1016/j.measurement.2011.01.016

- Siegler, I., Reymond, G., Kemeny, A., & Berthoz, A. (2001). Sensorimotor integration in a driving simulator: contributions of motion cueing in elementary driving tasks. *Proceedings of DSC Europe* (pp. 21–32). Nice, France.
- Skovgaard, I. (1995). Modelling relations between instrumental and sensory measurements in factorial experiments. *Food Quality and Preference*, 6(4), 239–244. doi:10.1016/0950-3293(95)00023-2
- SSHA. (1998). *Evaluation Sensorielle, Manuel Méthodologique*. Tec&Doc (Lavoisier.).
- Stevens, S. (1946). On the theory of measurement. *Science*, 103, 664–680.
- Stewart, D. (1965). A platform with six degrees of freedom. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 180(1965), 371–386. doi:10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02
- Strigler, F., Touraille, C., Sauvageon, F., Barthelemy, J., & Issanchou, S. (1998). Les épreuves. *évaluation sensorielle : manuel méthodologique* (Lavoisier.). Depledt F. & Strigler F.
- Thomas, P. (2006). The accident reduction effectiveness of ESC equipped cars in Great Britain. Presented at the 13th ITS World Congress, London.
- Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., & Droulez, J. (2003). Influence of Steering Wheel Torque Feedback in a Dynamic Driving Simulator. Presented at the DSC North America, Dearborn, Michigan.
- Toffin, D., Reymond, G., Kemeny, A., & Droulez, J. (2007). Role of steering wheel feedback on driver performance: driving simulator and modeling analysis. *Vehicle System Dynamics*, 45(4), 375–388. doi:10.1080/00423110601058874
- Tse, P. ., Intriligator, J., Rivest, J., & Cavanagh, P. (2004). Attention and the subjective expansion of time. *Perception & Psychophysics*, 66(7), 1171–1189.
- Vailleau, B. (2010). *Etude de la perception du mouvement propre 2D/3D dans les simulateurs de conduite dynamiques* (Thèse). Université Pierre et Marie Curie.
- Wann, J. P., & Swapp, D. K. (2000). Why you should look where you are going. *Nature neuroscience*, 3(7), 647–648. doi:10.1038/76602
- Watson, G., Papelis, Y., & Ahmad, O. (2006). Design of Simulator Scenarios to Study Effectiveness of Electronic Stability Control Systems. *Transportation Research Record*, 1980(1), 79–86. doi:10.3141/1980-13
- Weir, D. ., & Dimarco, R. (1978). *Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data* (No. 780010). Warrendale, PA: SAE International. Retrieved from <http://www.sae.org/technical/papers/780010>

- Wierwille, W. W., Casali, J. G., & Repa, B. S. (1983). Driver steering reaction time to abrupt-onset crosswinds, as measured in a moving-base driving simulator. *Human Factors*, 25(1), 103–116.
- Wilkie, R. ., & Wann, J. (2003). Controlling Steering and Judging Heading: Retinal Flow, Visual Direction and Extra-retinal Information. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(2), 363–378.
- Wilkie, R. ., & Wann, J. (2005). The role of visual and nonvisual information in the control of locomotion. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 31(5), 901–911. doi:10.1037/0096-1523.31.5.901
- Williams, A. A. (1994). Flavour quality — Understanding the relationship between sensory responses and chemical stimuli. What are we trying to do? The data, approaches and problems. *Food Quality and Preference*, 5(1–2), 3–16. doi:10.1016/0950-3293(94)90003-5
- Williams, E. (1949). Experimental Designs Balanced for the Estimation of Residual Effects of Treatments. *Australian Journal of Chemistry*, 2(2), 149. doi:10.1071/CH9490149